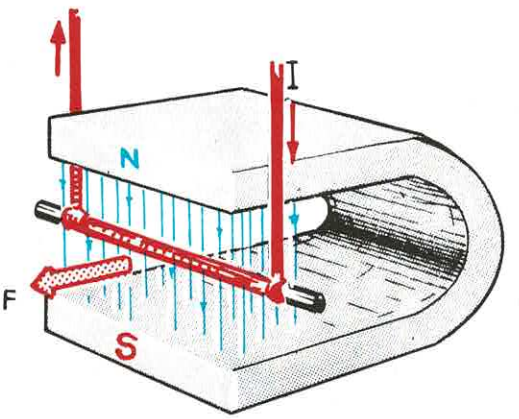
פרק טו – כוחות בשדה מגנטי

ראינו, בפרקים קודמים, כי בין שדות מגנטיים פועלים כוחות משיכה או דחייה. אנו נעסוק, בפרק זה, בכוחות הפועלים בין שדות מגנטיים, ונלמד שיטה לקביעת כיוון פעולתם וחישוב עוצמתם.

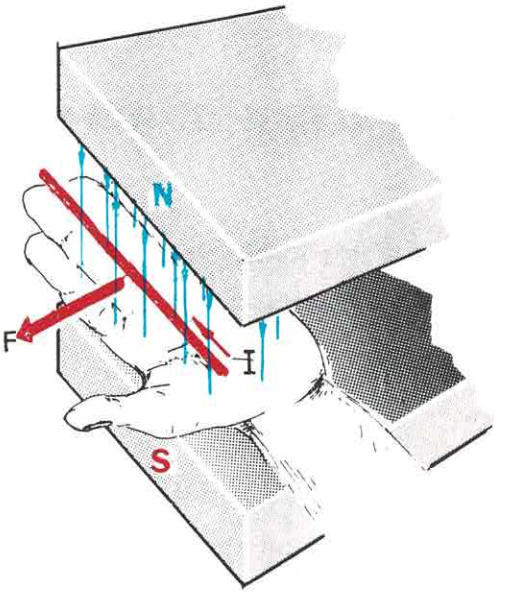
הכוח הפועל על תייל, נושא זרם, בשדה מגנטי

אם מכניסים תייל, נושא זרם, לתוך שדה מגנטי – תהיה השפעה הדדית בין שני השדות, ועל התייל יפעל כוח (F), אשר יגרום לתנועתו (ציור ט"ו1).



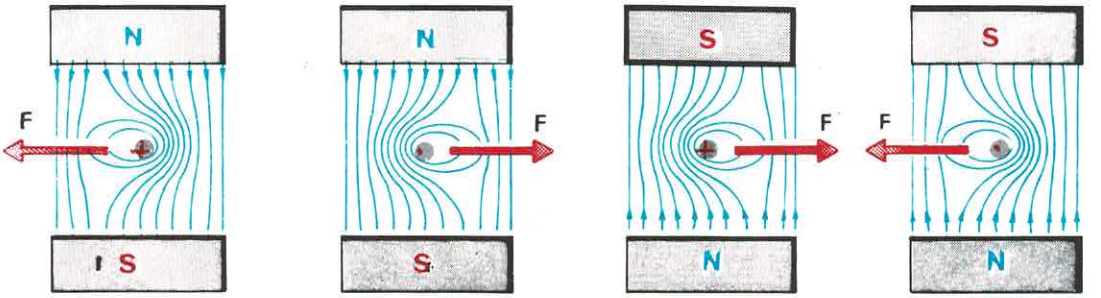
ציור ט"ו1

את כיוון התנועה של המוליך (כיוון הפעולה של הכוח) ניתן למצוא בעזרת כלל הקרוי כ ל ל ה י ד ה ש מ א ל י ת: מניחים את היד השמאלית כשכף היד פונה לכיוון הקוטב הצפוני והאצבעות מורות את כיוון זרימת הזרם במוליך – האגודל מורה את כיוון התנועה של התייל (ציור ט"ו2).



ציור ט"ו2

כיוון הפעולה של הכח תלוי, אם כן, בכיוון השדה המגנטי ובכיוון זרימת הזרם החשמלי. בציור ט"ו3 מתוארים מצבים שונים של פעולה הדדית בין שדה מגנטי קבוע לבין תייל מוליך, נושא זרם.



ציור ט"ו3

ניתן לסכם ולומר, כי על תייל נושא זרם, השרוי בשדה מגנטי, בניצב לקווי הכוח המגנטיים, יפעל כוח F השואף לדחוף את התייל אל מחוץ לשדה המגנטי.

חישוב עוצמת הכוח

הכוח (F) תלוי בשלושה גורמים: בהשראה (צפיפות השטף) של השדה המגנטי (B), בעוצמת הזרם בתייל (I), ובאורך התייל (ℓ), הנמצא בהשפעת השדה המגנטי.

ככל שההשראה (B), עוצמת הזרם (I) ואורך התייל (ℓ) יהיו גדולים יותר – כן תיגבר ההשפעה על התייל, והכוח (F) יהיה בעל עוצמה גדולה יותר.

ניתן לסכם ולומר, כי הכוח הפועל על תייל נושא זרם, בשדה מגנטי, נמצא ביחס ישר להשראה, לעוצמת הזרם ולאורך המוליך השרוי בשדה:

$$\boxed{F = BI\ell}$$

F : הכוח ביחידות "ניוטון" [N]

B : ההשראה בוובר-למ"ר [Wb/m^2]

I : עוצמת הזרם באמפרים [A]

ℓ : אורך התייל במטרים [m]

דוגמא: קטע של תייל באורך 10 ס"מ, הנושא זרם שעוצמתו 20 אמפר, שרוי בשדה מגנטי אחיד. חשב את הכוח הפועל על התייל, אם ההשראה היא 0.5 ווובר-למ"ר.

$$F = BI\ell = 0.5 \times 20 \times 10 \times 10^{-2} = 1N$$

דוגמא: מה צריכה להיות עוצמת הזרם, הזורם דרך תייל, שקטע שלו באורך 20 ס"מ שרוי בשדה מגנטי אחיד, בעל השראה של 1 ווובר-למ"ר, אם מעוניינים שעל התייל יפעל כוח של 0.5 ניוטון?

אם נשנה את נושא הנוסחא ונבטא את עוצמת הזרם (I), נקבל:

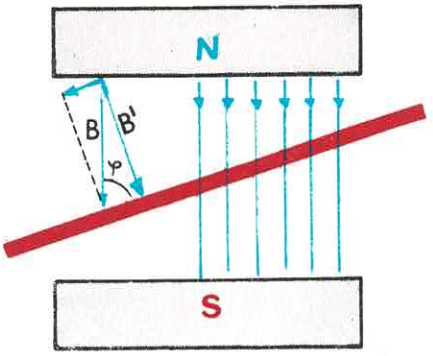
$$I = \frac{F}{B\ell} = \frac{0.5}{1\times 20\times 10^{-2}} = 2.5A$$

הנוסחא $F = BI\ell$ היא נכונה בשני תנאים:

א) שהשדה המגנטי הוא שדה אחיד.

ב) שקווי הכוח המגנטיים ניצבים לתייל.

בציור ט"ו4 מתואר מצב, בו תייל נושא-זרם נטוי בזוית ϕ כלפי קווי הכוח המגנטיים.



ציור ט"ו4

הואיל וההשראה (B) היא גודל מכוון (גודל וקטורי), ניתן להפרידו לשני רכיבים, ז (B') ניצב לתייל. הרכיב (B') הוא זה המשפיע על התייל.

אי לכך, הנוסחא המתאימה לחישוב הכוח הפועל על התייל תהיה:

$$F = B'I\ell$$

אם נתבונן במשולש שנוצר ניווכח, כי $B'/B = \sin\phi$; לכן $B' = B\sin\phi$

נציב ערך זה בנוסחא ונקבל:

$$\boxed{F = BI\ell\sin\phi}$$

F : הכוח הפועל על התייל ביחידות ניוטון [N]

B : ההשראה המגנטית ביחידות וובר-למ"ר [Wb/m^2]

I : עוצמת הזרם הזורם בתייל באמפרים [A]

ℓ : אורך התייל השרוי בשדה המגנטי במטרים [m]

ϕ : הזוית בין התייל לקווי הכוח המגנטיים במעלות [°]

דוגמא: קטע תייל באורך 10 ס"מ שרוי בשדה מגנטי בעל השראה של 0.2 ובר-למ"ר. חשב את הכוח הפועל על התייל, אם הוא נטוי בזווית בת 30° כלפי קווי הכוח, והזרם הזורם דרכו הוא בעוצמה של 5 אמפר.

$$F = BI\ell\sin\phi = 0.2 \times 5 \times 10 \times 10^{-2} \times \sin 30° = 0.1 \times \sin 30° N$$

כפי שידוע: $\sin 30° = 0.5$

לכן: $F = 0.1 \times 0.5 = 0.05N$

הנוסחא $F=BI\ell$ היא מיקרה פרטי של הנוסחא $F=BI\ell\sin\phi$

כאשר קווי הכוח ניצבים לתייל, הזווית ϕ היא בת 90° , לכן אם נציב $\sin 90°=1$ נקבל $F=BI\ell$.

אם נשנה את נושא הנוסחא $F=BI\ell$ ונבטא את (B) , נקבל:

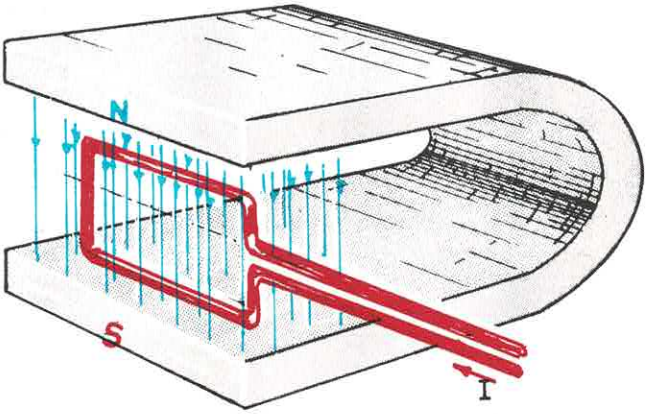
$$\boxed{B = \frac{F}{I\ell}}$$

אנו רואים, שאם הכוח הפועל על התייל הוא בשיעור 1 ניוטון, ואם עוצמת הזרם בתייל שאורכו 1 מטר, תהיה 1 אמפר - תהיה ההשראה 1 ובר-למ"ר. קשר זה מאפשר להגדיר את יחידת ההשראה המגנטית (B) :

<u>השראה מגנטית, בשיעור 1 ובר, היא אותה השראה, אשר תיגרום לכך שכוח בשיעור 1 ניוטון יפעל על תייל באורך 1 מטר, הנושא זרם שעוצמתו 1 אמפר, בהיותו שרוי בשדה מגנטי בניצב לקווי הכוח.</u>

המומנט הפועל על כריכה, נושאת זרם, בשדה מגנטי

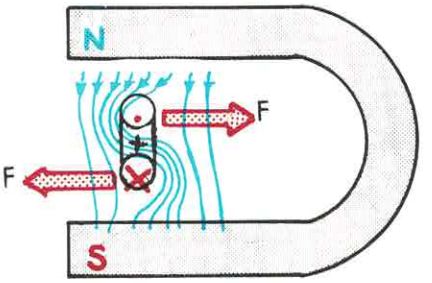
נתאר לעצמנו כריכה מלבנית, נושאת זרם, השרויה בשדה מגנטי אחיד, באופן שמישור הכריכה יהיה מקביל לקווי הכוח המגנטיים (ציור ט"ו5).



ציור ט"ו5

על הכריכה יפעלו כוחות, אשר ישאפו לסובב אותה סביב צירה.

בציור ט"ו6 מופיע חתך דרך הכריכה, וניתן לראות בבירור את ההשפעה ההדדית בין השדה של הכריכה לבין השדה של המגנט הקבוע. מסתבר שעל שני הקטעים של הכריכה, הניצבים לקווי הכוח, פועלים כוחות בכיוונים מנוגדים, ואלה שואפים לסובב את הכריכה סביב צירה, הואיל והם פועלים על אותו הגוף בכיוונים מנוגדים ובקווי פעולה שונים.



ציור ט"ו6

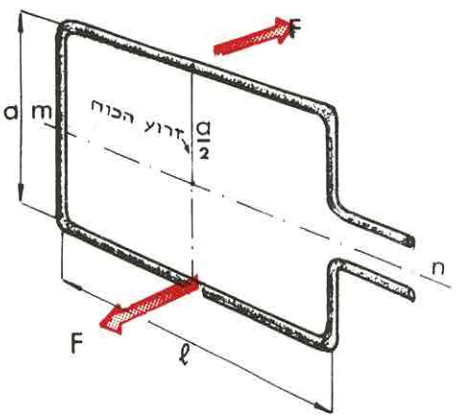
לעומת זאת על הקטעים המקבילים לקווי הכוח לא יפעלו כוחות, הואיל והזווית בין התייל לקווי הכוח היא $\phi=0$ ומסיבה זו:

$$F = BI\ell\sin 0° = BI\ell \times 0 = 0$$

כדי להביא לתנועה סיבובית, של גוף, עלינו להפעיל מ ו מ נ ט ס י ב ו ב.

מומנט סיבוב (M) מוגדר כמכפלת הכוח הפועל, באורך ה ז ר ו ע שלו, כאשר הזרוע היא המרחק בין ציר הסיבוב של הגוף לבין נקודת האחיזה של הכוח, בתנאי שקו הפעולה של הכוח ניצב לזרוע.

אם נתייחס לכריכה המלבנית - הכוח הפועל הוא (F) והזרוע היא (a/2) , אם יוצאים מתוך הנחה, שציר הסיבוב הוא ציר הכריכה mn (ציור ט"ו7).



ציור ט"ו7

מומנט הסיבוב של אחד הכוחות הוא: $M_1 = F\frac{a}{2}$

ומומנט הסיבוב של הכוח השני הוא: $M_2 = F\frac{a}{2}$

הואיל ושני המומנטים גורמים לסיבוב הרי שהמומנט השקול יהיה שווה לסכומם:

$$M = M_1 + M_2 = F\frac{a}{2} + F\frac{a}{2} = 2F\frac{a}{2} = Fa$$

הואיל וקטע התייל (ℓ) נשאר, גם לאחר הסיבוב, ניצב לקווי הכוח, הרי שהזווית היא בכל מקרה $90°$, ומסיבה זו $\sin 90° = 1$, והנוסחא לחישוב הכוח היא, כפי שכבר ראינו:

$$F = BI\ell$$

אם נציב ביטוי זה בנוסחאת המומנט, נקבל:

$$M = Fa = BI\ell a$$

אם נתבונן בציור ט"ו7 נראה, כי המכפלה ℓa , אינה אלא שטח הכריכה A ; אי לכך נוכל לרשום:

$$\boxed{M = BIA}$$

M : מומנט הסיבוב הפועל על כריכה, מקבילה לקווי הכוח, ביחידות ניוטון-מטר [Nm]

B : ההשראה ביחידות ובר-למ"ר [Wb/m^2]

I : עוצמת הזרם הזורם דרך הכריכה באמפרים [A]

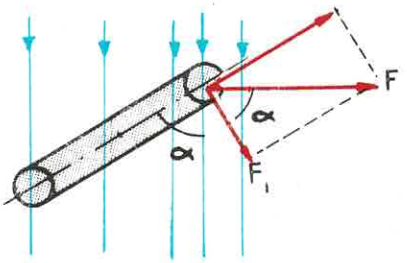
A : שטח הכריכה ב-מ"ר [m^2]

דוגמא: בשדה מגנטי אחיד בעל השראה של 0.5 ובר-למ"ר מצויה כריכה, שהמישור שלה מקביל לקווי הכוח. חשב את המומנט הפועל על הכריכה, אם היא נושאת זרם בעוצמה של 10 אמפר ומידותיה 3×4 ס"מ.

$$M = BIA = 0.5 \times 10 \times 3 \times 4 \times 10^{-4} = 6 \times 10^{-3} Nm$$

נבדוק עתה מקרה כללי, כאשר מישור הכריכה נטוי בזוית α כלפי קווי הכוח.

במקרה זה, כיוון הפעולה של הכוח F אינו ניצב לזרוע, ובנוסחאת המומנט הסיבובי יש להציב את הרכיב F_1 הניצב לזרוע (ציור ט"ו8).



ציור ט"ו 8

נוכל לרשום: $M = F_1 a$

אם נתבונן בציור ט"ו8, נראה את הקשר בין הכוח F לרכיבו F_1

$$\frac{F_1}{F} = \cos\alpha \quad \text{או} \quad F_1 = F\cos\alpha$$

אם נציב ביטוי זה בנוסחאת המומנט, נקבל: $M = F_1 a = Fa\cos\alpha$

כפי שכבר מצאנו: $F = BI\ell$

לכן: $M = BI\ell a\cos\alpha$

אם נציב בנוסחא האחרונה $A = \ell a$, נקבל את הנוסחא הכללית לחישוב המומנט הפועל על כריכה בשדה מגנטי:

$$\boxed{M = BIA\cos\alpha}$$

M : מומנט הסיבוב הפועל על כריכה בשדה מגנטי, ביחידות ניוטון-מטר [Nm]

B : ההשראה ביחידות ובר-למ"ר $[Wb/m^2]$

I : עוצמת הזרם הזורם דרך הכריכה באמפרים [A]

A : שטח הכריכה ב-מ"ר $[m^2]$

α : הזווית בין מישור הכריכה לקווי הכוח [°]

דוגמא: בשדה מגנטי אחיד, בעל השראה של 0.5 ובר-למ"ר, מצויה כריכה, שהמישור שלה נטוי בזווית בת 60° כלפי קווי הכוח.

חשב את המומנט הפועל על הכריכה, אם היא נושאת זרם בעל עוצמה של 20 אמפר ומידותיה 4×8 ס"מ.

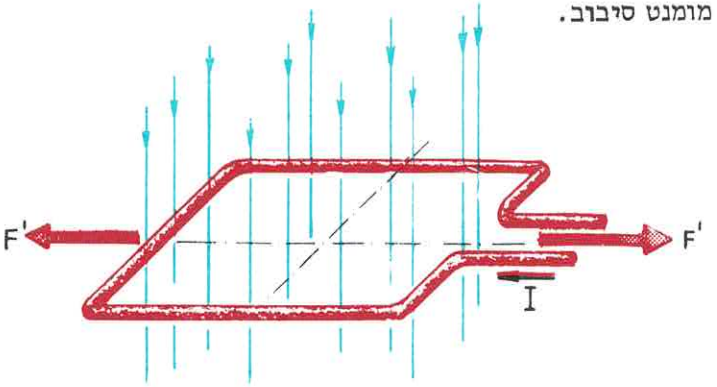
$$M=BIA\cos\alpha=0.5\times20\times4\times8\times10^{-4}\times\cos60°=320\times10^{-4}\times0.5=1.6\times10^{-2}Nm$$

כאשר מישור הכריכה מקביל לקווי הכוח $(\alpha = o)$, מקבלים $\cos\alpha = \cos0° = 1$; הנוסחא תקבל את הצורה $M = BIA$, וזו הנוסחא שמצאנו בראשית הדיון בנושא זה.

לעומת זאת, כאשר מישור הכריכה ניצב לקווי הכוח $(\alpha = 90°)$, מקבלים $\cos\alpha=\cos90°=0$; במקרה זה המומנט יהיה 0, והכריכה לא תסתובב.

המסקנה הנובעת מכאן היא, כי על כריכה מלבנית, נושאת זרם, השרויה בשדה מגנטי, פועל מומנט סיבוב השואף להביא את הכריכה למצב, בו מישור הכריכה ניצב לקווי הכוח המגנטיים.

נבדוק עתה מה דין הכוחות הפועלים על זוג הקטעים המקבילים הנותרים של הכריכה. אם נתבונן בציור ט"ו9, וניעזר בכלל היד השמאלית, ניווכח, כי שני הכוחות 'F הפועלים על קטעים אלה הם שווים בעוצמתם, מנוגדים בכיוון פעולתם ופועלים על אותו קו פעולה. מסיבות אלה מבטלים הכוחות זה את זה ואינם משפיעים כלל על מצבה של הכריכה, הואיל ואינם יוצרים מומנט סיבוב.



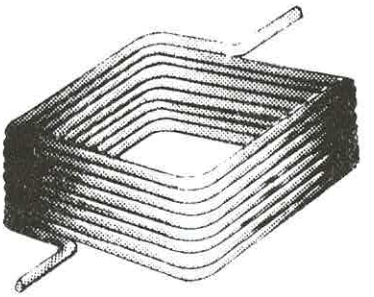
ציור ט"ו9

עקרון הפעולה של מד זרם בעל סליל נע

כפי שראינו, מומנט הסיבוב הפועל על כריכה, בשדה מגנטי, נמצא ביחס ישר להשראה (צפיפות השטף), לשטח הכריכה ולעוצמת הזרם הזורם בכריכה.

אי לכך, אם מעוניינים להגביר את המומנט הסיבובי הפועל על הכריכה, ניתן לעשות זאת על-ידי הגדלת שטח הכריכה, או על-ידי הגברת ההשראה המגנטית, או על-ידי הגברת עוצמת הזרם.

אפשרות אחרת היא לכרוך סליל מלבני בעל N כריכות מבודדות אלה מאלה (ציור ט"ו10).



ציור ט"ו10

אם נכרוך שתי כריכות - המומנט יהיה כפול בערכו, ואם נכרוך שלוש - המומנט יהיה גדול פי שלושה, הואיל והשדה המגנטי פועל על כל כריכה בנפרד, והמומנט הכללי ישווה לסכום המומנטים.

נוכל לומר, שהמומנט השקול שווה למומנט, הפועל על כריכה אחת כפול מספר הכריכות בסליל:

$$M = NBIA\cos\alpha$$

M : מומנט הסיבוב הפועל על סליל מלבני, בשדה מגנטי, ביחידות ניוטון-מטר [Nm]

B : השראת השדה המגנטי ביחידות ובר-למ"ר [Wb/m^2]

I : עוצמת הזרם, הזורם דרך הסליל, באמפרים [A]

N : מספר הכריכות בסליל [T]

A : שטח החתך של הסליל ב-מ"ר $[m^2]$

α : הזווית בין מישור החתך של הסליל לקווי הכוח [°]

דוגמא: חשב את שיעור המומנט הפועל על סליל מלבני בעל 10 כריכות, אשר מישור החתך שלו מקביל לקווי הכוח ושיטחו שווה ל-6 סמ"ר.
ההשראה היא 0.4 ובר-למ"ר ועוצמת הזרם בסליל 1 אמפר.

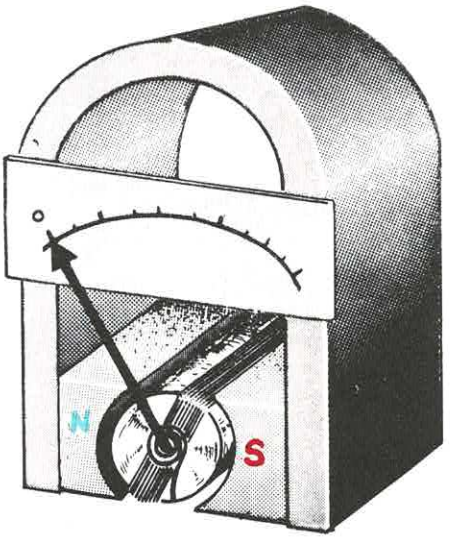
$$M = NBIA\cos\alpha = 0.4\times1\times10\times6\times10^{-4}\times1 = 2.4\times10^{-3}Nm$$

אם נכניס סליל מלבני לתוך שדה מגנטי, של מגנט פרסה קבוע, יהיו כל הגורמים, פרט לעוצמת הזרם, קבועים. במקרה זה, ניתן לשנות את המומנט הסיבובי של הסליל על-ידי שינוי עוצמת הזרם בלבד. עיקרון זה מנוצל במדי-זרם מטיפוס סליל נע.

המכשיר בנוי מגנט פרסה, אשר בין קטביו מורכבת, על ציר, מסגרת אלומיניום דקה וקלה. על מסגרת זו כרוך סליל מלבני, דרכו מזרימים את הזרם, אשר את עוצמתו מעוניינים למדוד.

במרכז הסליל מצוייה ליבת ברזל, אשר תפקידה להקטין את המיאון של המעגל המגנטי, על מנת שהשטף יהיה רב יותר. בין ליבה זו ובין הסליל אין מגע, והסליל עשוי להסתובב בחופשיות סביב צירו .

אל הסליל מחובר מחוג העשוי לנוע על פני לוח שנתות. קפיץ לולייני מיוחד מחובר אל הסליל, ומחזיקו במצב שהמחוג יימצא בתחילת לוח השנתות (ציור ט"ו11).



ציור ט"ו11

ברגע שמזרימים זרם דרך הסליל, מתפתח מומנט יחסי לעוצמת הזרם, הגורם לסיבוב הסליל, וכתוצאה מכך נע המחוג לאורכו של לוח השנתות. הקפיץ הלולייני נמתח כתוצאה מתנועת הסליל, ומפעיל על-ידי כך מומנט-נגדי-מאזן. הואיל ועל הסליל פועלים שני מומנטים מנוגדים, הוא מגיע למצב איזון, והמחוג מציין את עוצמת הזרם על גבי לוח השנתות. ככל שעוצמת הזרם הנמדד גבוהה יותר, מצב האיזון יתקבל בנקודה רחוקה יותר, על פני לוח השנתות.

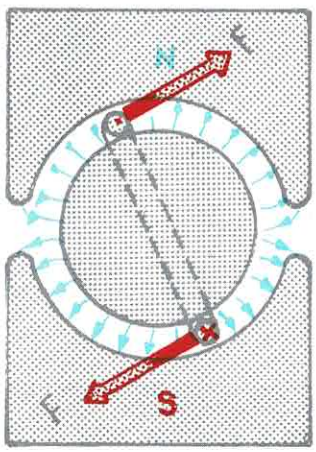
אם הופכים את מגמת זרימת הזרם, יתפתח מומנט סיבובי בכיוון נגדי, והמחוג ינוע בכיוון הפוך. מסיבה זו מכשיר זה מתאים למדידת זרם ישר בלבד, ואין אפשרות למדוד באמצעותו זרם חילופין.

כפי שראינו, המומנט הפועל על סליל מלבני הנתון בשדה מגנטי הוא בשיעור

$$M = NBIA\cos\phi$$

אי לכך, המומנט הפועל על הסליל, תלוי בזווית הנטייה של הסליל כלפי כיוון השדה. לא כן הדבר במד הזרם המופיע בציור ט"ו11.

הודות לקטבים המעוגלים והליבה הגליליות השדה המגנטי הוא שדה, אשר בו מקביל מישור הסליל לכיוון קווי הכוח המגנטיים בכל מקרה (ציור ט"ו12).



ציור ט"ו12

שדה מסוג זה קרוי ש ד ה ר ד י א ל י, הואיל וקווי הכוח פועלים בכיוון הרדיוס.

המסקנה הנובעת מכך היא, שהזווית (α) בין מישור הסליל לבין קווי הכוח היא 0 בכל מצב של הסליל, ומסיבה זו הנוסחא לחישוב המומנט הפועל על סליל מלבני תהיה:

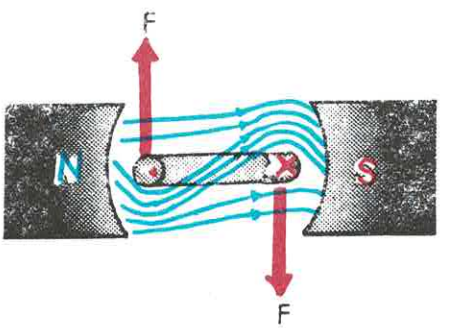
$$M = NBIA$$

עקרון הפעולה של מנוע לזרם ישר

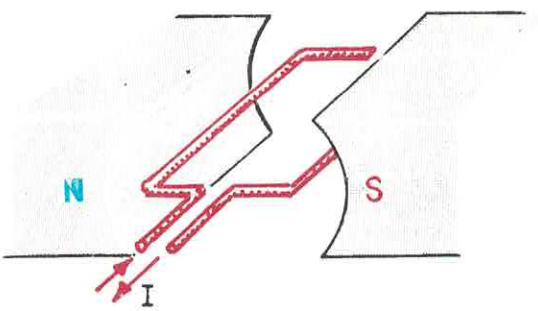
מנועים חשמליים משמשים להמרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכנית, ועקרון פעולתם דומה לזה של מד-זרם מטיפוס סליל-נע.

כפי שראינו, אם מכניסים כריכה נושאת זרם לתוך שדה מגנטי, כמתואר בציור ט"ו12, יפעל עליה מומנט סיבוב כתוצאה של הפעולה ההדדית בין השדות.

אם נתייחס למצב הכריכה שבציור ט"ו13, יהיה כיוון הסיבוב שלה כמתואר בציור ט"ו14.

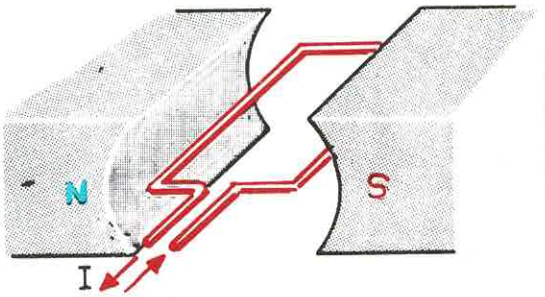


ציור ט"ו14

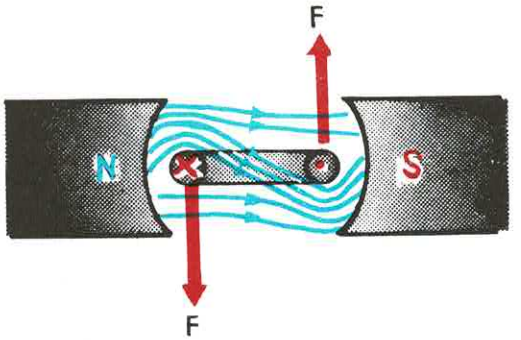


ציור ט"ו15

לאחר שהכריכה מסתובבת מחצית הסיבוב - קטע הכריכה, אשר היה בצד הקוטב הצפוני, יימצא בצד הקוטב הדרומי (ציור ט"ו15), והפעולה ההדדית בין השדות, במצב זה, תגרום למומנט סיבוב, השואף לסובב את הכריכה בכיוון הפוך (ציור ט"ו16).



ציור ט"ו 13

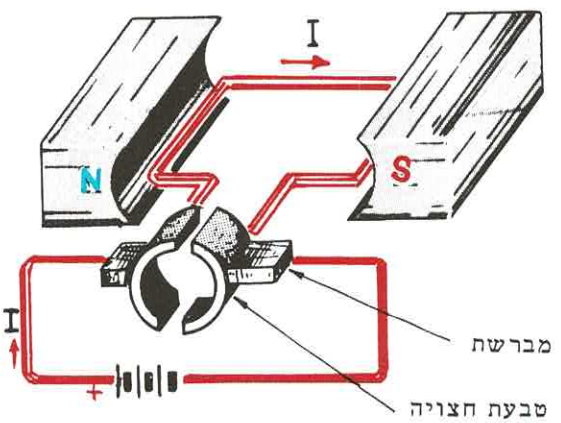


ציור ט"ו16

ברור, אם כן, שבתנאים אלה הכריכה לא תסתובב.

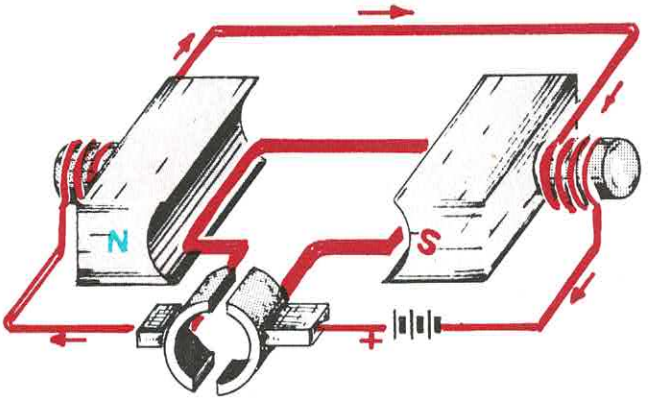
כדי להביא, בכל זאת, את הכריכה לסיבוב, מרכיביח בקצות הכריכה ט ב ע ת ה ח ל ק ה ח צ ו י ה, המחוברת באופן קשיח לכריכה ונעה עמה.

הטבעת החצויה מחליקה בין שני גופי פחם הקבועים למקומם וקרויים מ ב ר ש ו ת. הכריכה מוזנת בזרם חשמלי דרך המברשות והטבעת החצויה, ובאופן זה זורם הזרם תמיד באותו כיוון, למרות סיבוב הטבעת החצויה, ומומנט הסיבוב פועל באותו כיוון וגורם לסיבוב הכריכה (ציור ט"ו17).



ציור ט"ו17

נוהגים להשתמש באלקטרומגנטים במקום מגנטים קבועים. אלקטרומגנטים אלה מוזנים מאותו המקור (ציור ט"ו18).



ציור ט"ו18

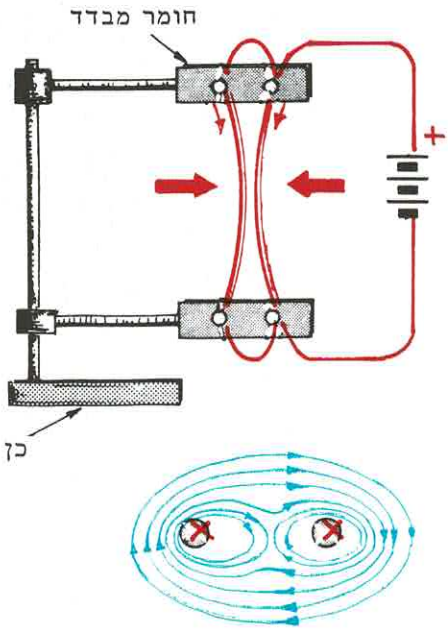
הכרנו כאן את עקרון הפעולה בלבד של מנועים לזרם ישר. המנועים שבמציאות בנויים כריכות רבות, הכרוכות על גבי גוף הקרוי ע ו ג ן.

מספר הכריכות הרב מאפשר מומנט-סיבוב חזק וגורם לסיבוב העוגן, המורכב על גל, ממנו מפיקים את תנועת הסיבוב המתבטאת באנרגיה מכנית.

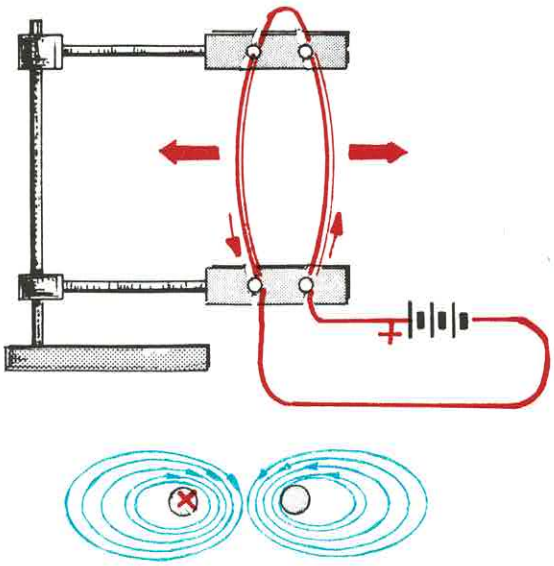
הכוח הפועל בין שני מוליכים מקבילים נושאי זרם

ראינו בפרק י"ג, כי בין שדות מגנטיים פועלים כוחות משיכה או דחייה.

שני תילים מקבילים נושאי זרם, הזורם באותה מגמה, מושכים זה את זה (ציור ט"ו19), ואותם התילים בהיותם נושאים זרם, הזורם במגמות מנוגדות, דוחים זה את זה (ציור ט"ו20).

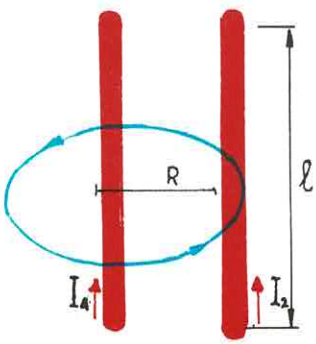


ציור ט"ו19



ציור ט"ו20

נראה עתה כיצד ניתן לחשב את עוצמת הכוח הפועל בין שני מוליכים מקבילים נושאי זרם. נניח ששני תילים בעלי אורך ℓ , מקבילים זה לזה והמרחק ביניהם הוא R . דרך התייל הראשון זורם זרם שעוצמתו I_1 ודרך השני זורם זרם שעוצמתו I_2 (ציור ט"ו21).



ציור ט"ו21

ראינו כבר כי עוצמת השדה המגנטי נמצאת ביחס ישר לכוח המגנטו מניע וביחס הפוך לאורך המסלול המגנטי. הואיל וקווי הכוח, סביב מוליך ישר, מתפשטים במעגלים שמרכזם במרכז התייל, הרי שאורך המסלול של קו הכוח, העובר דרך התייל השני, יהיה היקף המעגל $2\pi R$. הכוח המגנטו מניע הוא I_1N, לכן, אם ניקח בחשבון, שתייל ישר מהווה קטע של כריכה בעלת קוטר מאד גדול, הרי נוכל להניח $N=1$ ומסיבה זו הכוח-המגנטו-מניע יהיה שוה לעוצמת הזרם I .

נוכל לרשום:

$$H = \frac{I_1}{2\pi R}\left[\frac{AT}{m}\right]$$

אנו רואים, כי עוצמת השדה, בקירבת תייל ישר נושא זרם, נמצאת ביחס ישר לעוצמת הזרם וביחס הפוך למרחק מהתייל.

ההשראה בקרבת התייל היא: $B = \mu_o\mu_r H$

והואיל והתווך הוא אוויר, הרי: $\mu_r = 1$

לכן נוכל לרשום: $B = \mu_o H = \frac{\mu_o I_1}{2\pi R}\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$

ראינו, בתחילת פרק זה, כי עוצמת הכוח הפועל על מוליך נושא זרם, השרוי בשדה מגנטי היא:

$$F = BI\ell$$

לכן אם נתייחס למופיע בציור ט"ו211, נוכל לרשום:

$$F = BI_2\ell$$

נציב בנוסחא האחרונה את הביטוי המתאים ל- B ונקבל:

$$F = BI_2\ell = \frac{\mu_o I_1}{2\pi R} I_2\ell$$

נציב בנוסחא $\mu_o = 4\pi\times10^{-7}$ ונקבל:

$$F = \frac{4\pi\times10^{-7} I_1 I_2\ell}{2\pi R} = \frac{2\times10^{-7} I_1 I_2\ell}{R}$$

אנו רואים, כי הכוח הפועל בין שני מוליכים, בעלי אורך ℓ , הנושאים זרמים בעלי עוצמות I_1 ו- I_2 , והנמצאים במרחק R זה מזה, נמצא ביחס ישר לעוצמות הזרמים

ולאורך התילים, וביחס הפוך למרחק ביניהם.

$$F = \frac{2\times10^{-7} I_1 I_2 \ell}{R}$$

F : הכוח הפועל בין שני תילים נושאי זרם ביחידות "ניוטון" [N]

$I_1 I_2$: עוצמות הזרמים בתילים באמפרים [A]

ℓ : אורך התילים במטרים [m]

R : המרחק בין התילים במטרים [m]

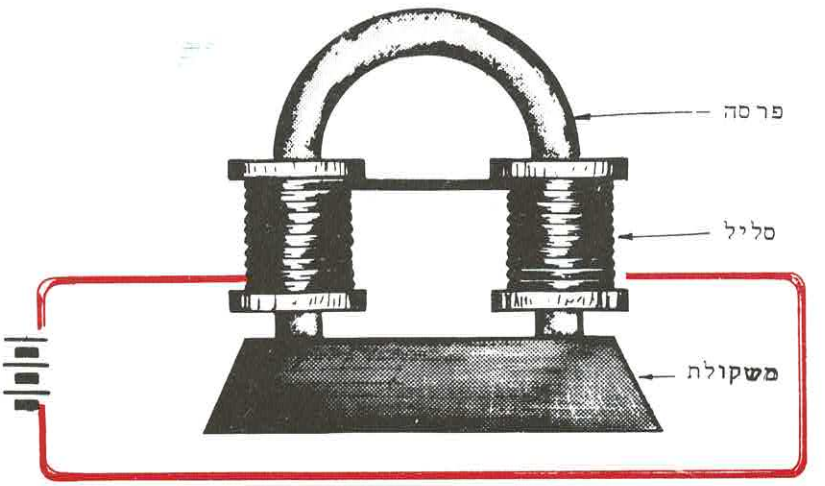
דוגמא: חשב את הכוח הפועל בין שני תילים מקבילים, אשר כל אחד מהם נושא זרם שעוצמתו 100 אמפר והמרחק ביניהם 50 ס"מ. אורך כל תייל 10 מטר.

$$F = \frac{2\times10^{-7} I_1 I_2 \ell}{R} = \frac{2\times10^{-7}\times100\times100\times10}{0.5} = 4\times10^{-2}N$$

נוכל להגדיר עתה הגדרה נוספת של יחידת עוצמת הזרם: אמפר אחד היא עוצמת הזרם, הזורם דרך כל אחד משני תילים מקבילים, המרוחקים מרחק של מטר אחד זה מזה, אם הכוח הפועל בין שני קטעים באורך מטר אחד של המוליכים הוא 2×10^{-7} ניוטון.

כוח המשיכה של אלקטרומגנט

בציור ט"ו22 מתואר אלקטרומגנט פרסה בעל שני סלילים, המחובר למקור מתח, ובין קוטבי האלקטרומגנט מחוברת משקולת ברזל.



ציור ט"ו22

את כוח המשיכה, או כוח ההרמה של אלקטרומגנט, כפי שנוהגים לכנותו, ניתן למצוא בדרך נסיונית, על-ידי החלפת המשקולות עד שמוצאים את המשקולת הכבדה ביותר שהאלקטרו-מגנט מסוגל לשאת.

ניתן, כמו כן, לחשב את כוח ההרמה של אלקטרומגנט באמצעות הנוסחא:

$$\boxed{F = \frac{10^7 B^2 A}{8\pi}}$$

F : כוח ההרמה ביחידות ניוטון [N]

B : צפיפות השטף ביחידות ובר-למ"ר [Wb/m^2]

A : שטח המגע בין הקטבים לגוף המורם במ"ר [m^2]

אנו רואים, כי כוח ההרמה של אלקטרומגנט נמצא ביחס ישר לריבוע צפיפות השטף המגנטי וביחס ישר לשטח המגע בין הקוטב או הקטבים של האלקטרומגנט.

דוגמא: ליפוף העירור של אלקטרומגנט יוצר שטף בעל צפיפות של 1 ובר-למ"ר. חשב את כוח ההרמה של האלקטרומגנט, אם שטח קטביו הוא 100 סמ"ר.

$$F = \frac{10^7 B^2 A}{8\pi} = \frac{10^7 \times (1)^2 \times 100 \times 10^{-4}}{8 \times 3.14} = 3980N$$

כפי שראינו בפרק הקודם:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{NI}{AR_m} \left[\frac{Wb}{m^2}\right]$$

אם נציב ביטוי זה בנוסחא לחישוב כוח ההרמה של אלקטרומגנט, נקבל:

$$F = \frac{10^7 B^2 A}{8\pi} = \frac{10^7}{8\pi} \left(\frac{NI}{AR_m}\right)^2 A = \frac{10^7}{8\pi} \frac{N^2 I^2}{AR_m} \ [N]$$

אנו רואים, כי כוח המשיכה של אלקטרומגנט נמצא ביחס ישר לריבוע עוצמת זרם המיגנוט, וביחס ישר לריבוע מספר הכריכות.

שאלות סיכום ובעיות לפרק טו

בחן את ידיעותיך

לפניך אוסף שאלות ברירה, ולכל שאלה מספר תשובות, אשר רק אחת מהן נכונה. עליך לבחור את התשובה הנכונה, ולסמן אותה על דף נפרד. לאחר מכן השווה את תשובותיך עם התשובות, המצויות בסוף הספר כדי לקבוע עד כמה מובן לך החומר אשר למדת.

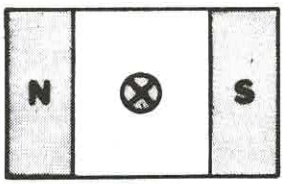
ט"ו1) אם מכניסים תייל נושא זרם לתוך שדה מגנטי:

א) הזרם בתייל ישנה את מגמת זרימתו.
ב) התייל יתחמם בהשפעת השדה המגנטי.
ג) לא תהיה כל השפעה על התייל.
ד) על התייל יפעל כוח.

ט"ו2) את כיוון הכוח הפועל על תייל, נושא זרם, בשדה מגנטי, קובעים על-ידי:

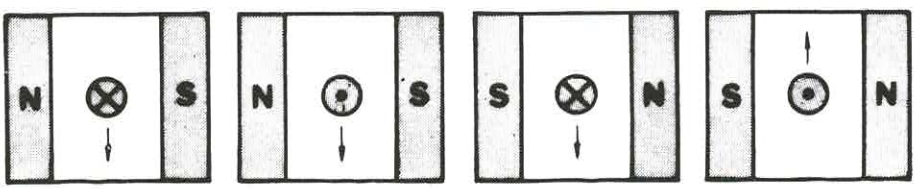
א) כלל הבורג.
ב) כלל היד הימנית.
ג) כלל כף היד השמאלית.
ד) כלל כף היד הימנית.

ט"ו3) המוליך המופיע בתרשים ינוע:



א) למעלה.
ב) למטה.
ג) ימינה.
ד) שמאלה.

ט"ו4) איזה מהתרשימים הבאים הוא הנכון?



א) ב) ג) ד)

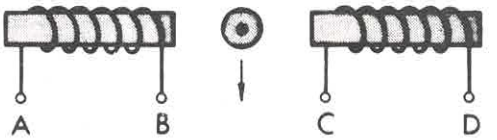
ט"ו5) **על מנת שהמוליך המופיע בתרשים ינוע בכיוון החץ, עלינו לבצע חיבורים כדלהלן:**

א) לחבר את הנקודות B ו- C ביניהן, את הנקודה D לקוטב החיובי של מקור המתח ואת הנקודה A לקוטב השלילי.

ב) לחבר את הנקודות B ו- C ביניהן, את הנקודה D לקוטב השלילי של מקור המתח ואת הנקודה A לקוטב החיובי.

ג) לחבר את הנקודות A ו- D לקוטב החיובי של מקור המתח ואת הנקודות B ו- C לקוטב השלילי.

ד) לחבר את הנקודות A ו- D לקוטב השלילי של מקור המתח ואת הנקודות B ו- C לקוטב החיובי.



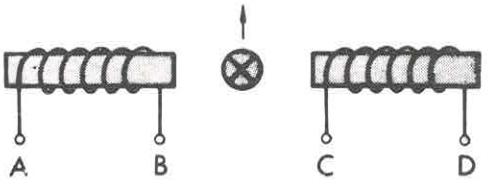
ט"ו6) **על מנת שהמוליך המופיע בתרשים ינוע בכיוון החץ, עלינו לבצע חיבורים כדלהלן:**

א) לחבר את הנקודות B ו- C ביניהן, את הנקודה D לקוטב החיובי של מקור המתח ואת הנקודה A לקוטב השלילי.

ב) לחבר את הנקודות B ו- C ביניהן, את הנקודה D לקוטב השלילי של מקור המתח ואת הנקודה A לקוטב החיובי.

ג) לחבר את הנקודות A ו- D לקוטב החיובי של מקור המתח ואת הנקודות B ו- C לקוטב השלילי.

ד) לחבר את הנקודות A ו- D לקוטב השלילי של מקור המתח ואת הנקודות B ו- C לקוטב החיובי.



ט"ו7) בהתאם לכלל כף היד השמאלית:

א) אם כף היד מופנית כלפי הקוטב הצפוני והאגודל בכיוון זרימת הזרם, יציינו האצבעות את כיוון הכוח הפועל על המוליך.

ב) אם כף היד מופנית כלפי הקוטב הדרומי והאצבעות בכיוון זרימת הזרם, יציין האגודל את כיוון הכוח הפועל על המוליך.

ג) אם כף היד מופנית כלפי הקוטב הצפוני והאצבעות בכיוון זרימת הזרם, יציין האגודל את כיוון הכוח הפועל על המוליך.

ד) אם האגודל מופנה כלפי הקוטב הצפוני והזרם נכנס בכיוון כף היד, יצייגו האצבעות את כיוון הכוח הפועל על המוליך.

ט"ו8) הכוח הפועל על תייל, נושא זרם, בתוך שדה מגנטי:

א) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית, ביחס ישר לעוצמת הזרם וביחס ישר לאורך המוליך, הנמצא בתחום ההשפעה של השדה.

ב) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית, ביחס ישר לעוצמת הזרם וביחס הפוך לאורך המוליך, הנמצא בתחום ההשפעה של השדה.

ג) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית וביחס הפוך לעוצמת הזרם ולאורך המוליך, הנמצא בתחום ההשפעה של השדה.

ד) נמצא ביחס ישר לעוצמת הזרם ולאורך המוליך, וביחס הפוך להשראה.

ט"ו9) הנוסחא $F = BI\ell$ נכונה:

א) בתנאי שהשדה המגנטי הוא אחיד והתייל ניצב לקווי הכוח.

ב) בתנאי שהשדה המגנטי הוא אחיד והתייל מקביל לקווי הכוח.

ג) בתנאי שהשדה המגנטי הוא אחיד ואין חשיבות למצב התייל.

ד) בכל שדה מגנטי ובכל מצב של התייל.

ט"ו10) כריכה מלבנית, נושאת זרם, נמצאת בתוך שדה מגנטי. על הכריכה פועל:

א) זוג כוחות, שווי עוצמה, אך מנוגדים בכיווניהם, ומסיבה זו תישאר הכריכה במנוחה.

ב) כוח השואף להוציאה מתוך השדה המגנטי.

ג) מומנט סיבובי, השואף להביאה למצב מקביל לקווי הכוח המגנטיים.

ד) מומנט סיבוב, השואף להביאה למצב ניצב לקווי הכוח המגנטיים.

ט"ו11) המומנט הסיבובי, הפועל על כריכה נושאת זרם, השרויה בשדה מגנטי:

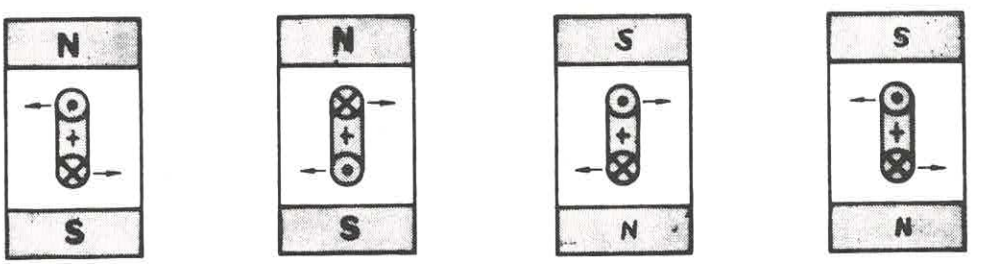
א) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית של השדה ולעוצמת הזרם בכריכה, וביחס הפוך לשטח הכריכה.

ב) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית של השדה, לעוצמת הזרם בכריכה ולשטח הכריכה.

ג) נמצא ביחס ישר לעוצמת הזרם בכריכה, וביחס הפוך להשראה המגנטית של השדה ולשטח הכריכה.

ד) נמצא ביחס ישר לעוצמת הזרם בכריכה, להשראה של השדה המגנטי ולאורך הכריכה.

ט"ו12) איזה מהתרשימים הבאים הוא הנכון?



א) ב) ג) ד)

ט"ו13) באמצעות מד זרם, מטיפוס סליל נע, ניתן למדוד:

א) עוצמת זרם ישר ועוצמת זרם חילופין.

ב) עוצמת זרם ישר בלבד.

ג) עוצמת זרם חילופין בלבד.

ד) עוצמות זרם חזקות בלבד.

ט"ו14) **ליבת הברזל, בלב הסליל המלבני של מד זרם, משמשת:**

א) להגדלת משקל הסליל.

ב) לייצוב תנועת המחוג.

ג) להקטנת המיאון של המעגל המגנטי.

ד) בתור גוף עליו מלופף הסליל.

ט"ו15) **מנוע חשמלי משמש:**

א) להמרת אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכנית.

ב) להמרת אנרגיה מכנית לאנרגיה חשמלית.

ג) ליצירת מומנטים סיבוביים מנוגדים.

ד) ליצירת מומנטים סיבוביים באותו כיוון.

ט"ו16) **תפקיד הטבעת החצוייה במנוע שהכרנו הוא:**

א) לאפשר זרימת זרם בכריכה בעת הסיבוב.

ב) לאפשר זרימת זרם בכריכה באותו הכיוון למרות סיבובה.

ג) לאפשר זרימת זרם בכריכה בכיוונים מנוגדים בעת סיבובה.

ד) לחבר בין מקור המתח לכריכה של המנוע.

ט"ו17) **השדה המגנטי של מנוע לזרם ישר:**

א) חייב להיות שדה, הנוצר על-ידי מגנט קבוע.

ב) חייב להיות שדה, הנוצר על-ידי אלקטרומגנט.

ג) יכול להיות שדה, הנוצר על-ידי מגנט קבוע או אלקטרומגנט.

ד) חייב להיות מגנט קבוע עליו כרוך סליל עירור.

ט"ו18) **בין שני מוליכים מקבילים נושאי זרמים שכיווניהם מנוגדים:**

א) אין פועלים כוחות.

ב) פועל מומנט סיבוב.

ג) פועלים כוחות משיכה.

ד) פועלים כוחות דחייה.

ט"ו19) **בין שני מוליכים מקבילים נרשאי זרמים שכיווניהם זהים:**

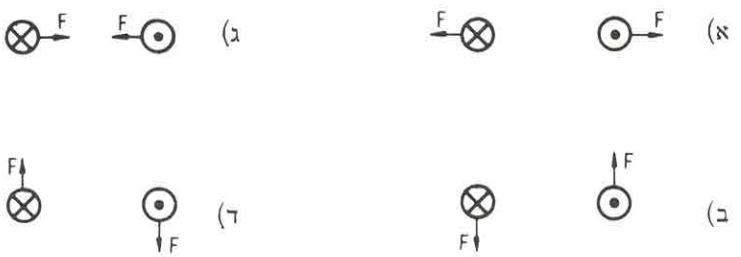
א) אין פועלים כוחות.

ב) פועל מומנט סיבוב.

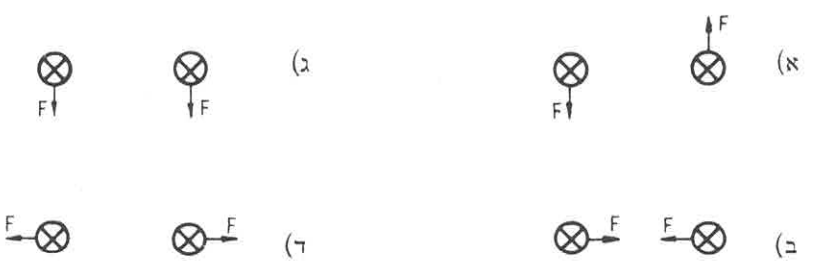
ג) פועלים כוחות משיכה.

ד) פועלים כוחות דחייה.

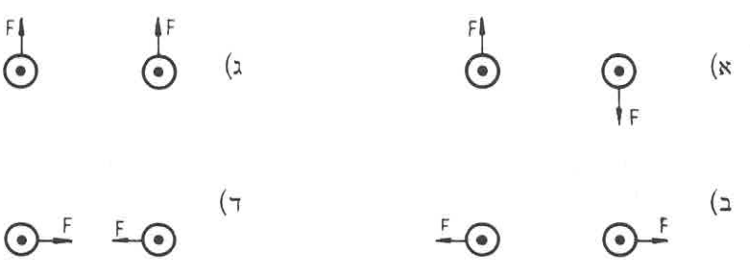
ט"ו20) איזהו התרשים הנכון?



ט"ו21) איזהו התרשים הנכון?



ט"ו22) איזהו התרשים הנכון?



ט"ו23) הכוחות הפועלים בין שני מוליכים מקבילים, נושאי זרם, נמצאים:

א) ביחס ישר למרחק בין המוליכים.

ב) ביחס הפוך למרחק בין המוליכים.

ג) ביחס ישר לריבוע המרחק בין המוליכים.

ד) ביחס הפוך לריבוע המרחק בין המוליכים.

ט"ו24) כוח המשיכה של אלקטרומגנט נמצא:

א) ביחס ישר להשראה המגנטית וביחס ישר לשטח הקטבים.

ב) ביחס ישר להשראה המגנטית וביחס הפוך לשטח הקטבים.

ג) ביחס ישר לריבוע ההשראה המגנטית וביחס ישר לשטח הקטבים.

ד) ביחס ישר לריבוע ההשראה המגנטית וביחס הפוך לשטח הקטבים.

ט"ו25) אם נגדיל פי שניים את עוצמת זרם המיגנוט של אלקטרומגנט:

א) יגדל כוח המשיכה שלו פי ארבעה.

ב) יגדל כוח המשיכה שלו פי שניים.

ג) לא ישתנה כוח המשיכה.

ד) אין אפשרות להגדיל פי שניים את עוצמת זרם המיגנוט של אלקטרומגנט.

ט"ו26) אם נגדיל פי שניים את מספר הכריכות של אלקטרומגנט:

א) יגדל כוח המשיכה שלו פי ארבעה.

ב) יגדל כוח המשיכה שלו פי שניים.

ג) לא ישתנה כוח המשיכה.

ד) אין קשר בין כוח ההרמה לבין מספר הכריכות.

ט"ו27) שני אלקטרומגנטים, אשר אחד מהם עשוי מוט ישר והשני מוט כפוף בצורת פרסה, זהים בסוג החומר, באורך הליבה, בשטח חתך הליבה ובמספר האמפר-כריכות:

א) לשני האלקטרומגנטים יהיה אותו כוח הרמה.

ב) למוט יהיה כוח הרמה חזק יותר.

ג) לפרסה יהיה כוח הרמה חזק יותר.

ד) המוט יהיה חסר כוח הרמה.

ט"ו1) תייל שאורכו 20 ס"מ נושא זרם שערצמתו 100 אמפר. חשב את עוצמת הכוח שיפעל על תייל זה, אם נכניסו לתוך שדה מגנטי (בזווית ישרה לקוי הכוח), אם צפיפות השטף היא 0.005 ווברי-למ"ר.

ט"ו2) תייל באורך 40 ס"מ שרוי בשדה מגנטי, בו צפיפות השטף היא 0.6 ווברי-למ"ר. חשב את הכוח הפועל על התייל, אם הוא נמצא בזווית בת 90° כלפי קוי הכוח ונושא זרם בעוצמה של 50 אמפר.

ט"ו3) מהו הכח הפועל על תייל באורך 15 ס"מ, הנושא זרם שעוצמתו 180 אמפר, אם הוא נתון בזווית ישרה כלפי קוי הכוח של שדה מגנטי, שצפיפות השטף בו היא 0.75 ווברי-למ"ר?

ט"ו4) זרם בעל איזו עוצמה יש להזרים דרך תייל, שאורכו 30 ס"מ והוא שרוי בשדה מגנטי אחיד, שצפיפות השטף בו היא 0.5 ווברי-למ"ר, על מנת שיפעל עליו כח של 15 ניוטון, כאשר התייל יוצר זווית בת 90° עם קוי הכח?

ט"ו5) מוליך שאורכו 20 ס"מ ונושא זרם בעוצמה של 10 אמפר - שרוי בשדה מגנטי אחיד ויוצר זווית בת 90° עם קוי הכח.
מהי צפיפות השטף, אם על המוליך פועל כוח, שעוצמתו 1.2 ניוטון?

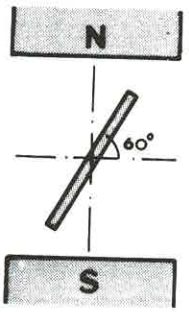
ט"ו6) קו הנושא זרם בעוצמה של 2000 אמפר נתון בשדה מגנטי, שצפיפות השטף בו היא 0.01 ווברי-למ"ר, במאונך לקוי הכח.
חשב את הכח הפועל על כל מטר מאורך הקו.

ט"ו7) מוליך, שאורכו 15 ס"מ ונושא זרם שערצמתו 6 אמפר, נתון בשדה מגנטי, שצפיפות השטף בו היא 0.5 ווברי-למ"ר. חשב את הכח הפועל על המוליך, אם הוא נטוי בזווית בת 30° כלפי כיוון השדה.

ט"ו8) מוליך, שאורכו 20 ס"מ ונושא זרם שערצמתו 10 אמפר, נתון בשדה מגנטי, שצפיפות השטף בו היא 1 ווברי-למ"ר. המוליך נמצא בתנועה ומשנה את הזווית בינו לבין כיוון השדה. חשב את עוצמת הכח הפועל על המוליך בזוויות 0° , 30° , 90° .

ט"ו9) תייל שאורכו 1 מ'. נתון בשדה מגנטי אחיד, בו ההשראה היא 1.25 ווبר-למ"ר, והוא מאונך לקווי הכוח המגנטיים.
התייל מהווה קטע של מעגל חשמלי טורי, שהתנגדותו השקולה 6 אום והוא מחובר למקור מתח של 24 וולט. חשב את הכוח הפועל על התייל.

ט"ו10) חשב את הכוח הפועל על התייל, המופיע בציור ט"ו23, אם אורכו 20 ס"מ והוא נושא זרם שעוצמתו 50 אמפר, אם צפיפות השטף היא 1 ווبר-למ"ר.



ציור ט"ו23

ט"ו11) כריכה מלבנית, אשר אורכה 10 ס"מ ורחבה 5 ס"מ, נתונה בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1.2 ווبר-למ"ר, כמקביל לקווי הכוח.
חשב את המומנט הפועל על הכריכה בהיותה נושאת זרם בעל עוצמה של 3 אמפר.

ט"ו12) כריכה מלבנית, שאורכה 3 ס"מ ורחבה 2 ס"מ נושאת זרם בעוצמה של 2 אמפר, ומסתובבת בתוך שדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1.5 ווبר-למ"ר. חשב את המומנט הפועל על הכריכה בשלושה מצבים:
א) בהיותה מקבילה לקווי הכוח.
ב) בהיותה נטויה בזווית בת 60° כלפי קווי הכוח.
ג) בהיותה ניצבת לכיוון קווי הכוח.

ט"ו13) חשב את שיעור המומנט הפועל על סליל מלבני בעל 100 כריכות, אשר מישור החתך שלו מקביל לקווי הכוח ושיטחו שווה ל-20 סמ"ר.
ההשראה היא 1 ווبר-למ"ר ועוצמת הזרם בסליל 10 אמפר.

ט"ו14) חשב את שיעור המומנט הפועל על הסליל הנע של מד זרם, אם אורכו 3 ס"מ, רחבו 2 ס"מ והוא כרוך 60 כריכות. השדה הרדיאלי, בו נתון הסליל, הוא בעל השראה של 0.1 ווبר-למ"ר. עוצמת הזרם בסליל היא 0.01 אמפר.

ט"ו15) מידותיו של סליל נע הן 20×30 מ"מ. הסליל כרוך 400 כריכות. ההשראה המגנטית הרדיאלית היא 7×10^{-4} ווברלמ"ר ועוצמת הזרם בסליל 5×10^{-3} אמפר.
חשב את המומנט הסיבובי הפועל על הסליל.

ט"ו16) אורכו של סליל מלבני 3 ס"מ ורוחבו 2 ס"מ. הסליל כרוך 250 כריכות של תיל נחושת בעל שטח חתך של 0.06 ממ"ר.
הסליל נתון בשדה רדיאלי בעל השראה מגנטית של 0.4 ווברלמ"ר.
חשב את המומנט הפועל על הסליל, אם הוא מחובר למתח של 0.030 וולט.
ההתנגדות הסגולית של נחושת היא 0.018 אום-ממ"ר למטר.

ט"ו17) עוצמת הזרם בקו היא 628 אמפר. חשב את עוצמת השדה המגנטי במרחק 10 ס"מ מהקו.

ט"ו18) מהו הכוח הפועל בין שני קווי הזנה, אשר כל אחד מהם נושא זרם שעוצמתו 100 אמפר והמרחק ביניהם 50 ס"מ?
(חשב את הכוח לכל מטר מאורך הקו).

ט"ו19) בין שני עמודי חשמל המרחקים 20 מטר זה מזה מתוחים שני תילים המרחקים 40 ס"מ זה מזה. כל תייל נושא זרם שעוצמתו 500 אמפר.
חשב את הכוח הפועל בין התילים.

ט"ו20) דרך שני מוטות נחושת מקבילים, שאורכם 2 מטר, זורם זרם בעוצמה של 100 אמפר. חשב את הכוח הפועל ביניהם, אם הם מרוחקים 20 ס"מ זה מזה.
בשעת קצר חשמלי עלתה עוצמת הזרם במוטות ל-1000 אמפר.
חשב את הכוח הפועל בין שני המוטות בשעת הקצר.

ט"ו21) שטח פני כל קוטב של אלקטרומגנט פרסה הוא 157 סמ"ר. סליל המיגנוט יוצר השראה של 1 ווברלמ"ר. חשב את כוח המשיכה של האלקטרומגנט.

ט"ו22) חשב את כוח ההרמה של אלקטרומגנט פרסה, אם צפיפות השטף היא 0.8 ווברלמ"ר ושטח החתך של כל קוטב הוא 50 סמ"ר.

פרק טז - **ההשראה האלקטרומגנטית**

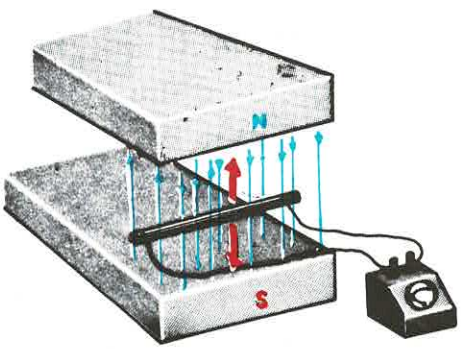
ראינו בפרק הקודם, שאם על תייל נושא זרם, הנתון בשדה מגנטי, יפעל כוח והוא חופשי לנוע, אזי ינוע בכיוון הכוח הפועל.

הפיסיקאי הנודע פרדיי גילה, כי הפעולה הנ"ל היא הפיכה, ואם מניעים תייל בתוך שדה מגנטי, יופיע בין קצות התייל כוח-אלקטרו-מניע, ואם התייל מהווה חלק של מעגל חשמלי סגור, יזרום בו זרם חשמלי.

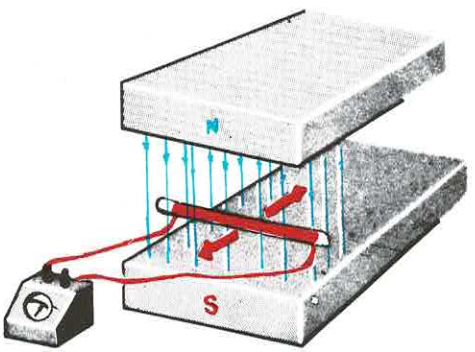
פעולה זו קרוייה ה ש ר א ה א ל ק ט ר ו מ ג נ ט י ת; הכא"מ המתעורר בין קצות התייל קרוי כ א " מ מ ו ש ר ה, והזרם במעגל קרוי ז ר ם מ ו ש ר ה.

יצירת כא"מ מושרה

אם נכניס תייל לתוך שדה מגנטי, לא יושרה בו כוח-אלקטרו-מניע גם כאשר נניע את התייל בכיוון מקביל לקווי הכוח המגנטיים (ציור ט"ז1). לעומת זאת, אם נניע את התייל בכיוון ניצב לקווי הכוח, יושרה בו כוח-אלקטרו-מניע, ואם הוא מהווה חלק ממעגל חשמלי **סגור, יזרום בו זרם חשמלי (ציור ט"ז2).**



ציור ט"ז1

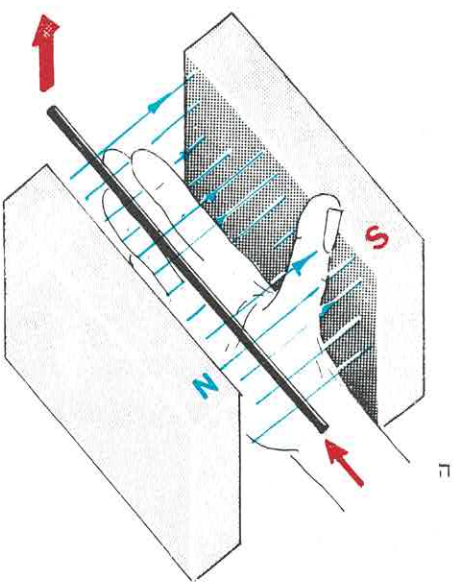


ציור ט"ז2

המסקנה הנובעת מכך היא: כאשר תייל מוליך חותך קווי כוח מגנטיים, מושרה בתייל כוח-אלקטרו-מניע. הוא הדין גם כאשר התייל נמצא במנוחה והמגנט נע באופן שהתייל יחתוך קווי כוח מגנטיים.

מ ג מ ת ה כ ו ח - ה א ל ק ט ר ו - מ נ י ע ה מ ו ש ר ה

את מגמת הכוח-האלקטרו-מניע המושרה קובעים באמצעות כ ל ל כ ף ה י ד ה י מ נ י ת: מניחים את היד הימנית באופן שכף היד תפנה לכיוון הקוטב הצפוני, והאגודל יורה את כיוון התנועה של המוליך - האצבעות יורו את מגמת הכא"מ המושרה (ציור ט"ז3).

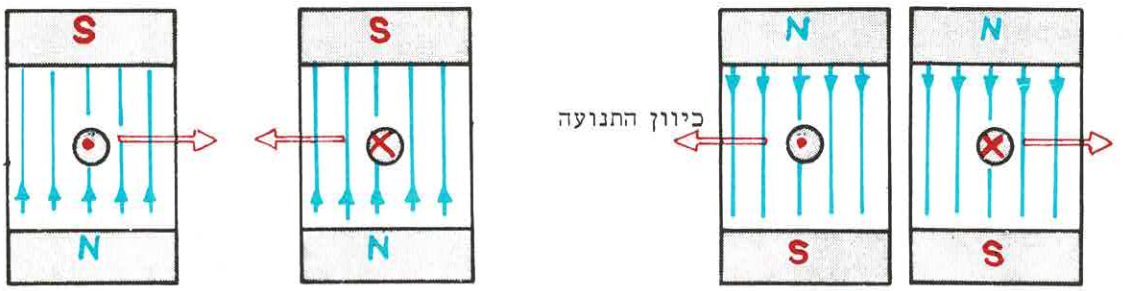


ציור ט"ז3

אנו רואים, כי כיוון הכא"מ המושרה תלוי בקוטביות של השדה המגנטי ובכיוון התנועה של התייל. המסקנה הנובעת מזה היא שאם נניע את התייל, בניצב לקווי הכוח, הלוך ושוב, ישתנה כיוון הכא"מ המושרה בתייל.

נתאר עתה כמה מצבים שונים (ציור ט"ז4).

אם נשווה את ציור ט"ז4, עם ציור ט"ו3 (בפרק הקודם), ניווכח, כי זרם מושרה, הזורם בתייל הנע בשדה מגנטי, יוצר כוח, שמגמתו מנוגדת למגמת הכוח המניע את התייל בשדה. למסקנה זו הגיע המדען הרוסי לנץ וניסוח מסקנתו ידוע כחוק לנץ.



ציור ט"ז4

<u>חוק לנץ:</u> זרם המושרה בתייל, כתוצאה מהשראה אלקטרומגנטית, יוצר כוח שמגמתו הפוכה למגמת הכוח, אשר הניע את התייל וגרם להשראה. במילים אחרות: זרם, המושרה בתייל, מתנגד לסיבת יצירתו על-ידי יצירת כוח, שמגמתו הפוכה לזה שייצר אותו.

ערכו של הכא"מ המושרה בתייל הנע בשדה מגנטי

לפי פרדיי: הכוח-האלקטרו-מניע המושרה תלוי במספר קווי הכוח שהתייל חותך, תוך תנועתו, ביחידת זמן.

נניח שתייל שאורכו 1 מטר, נע במהירות של 1 מטר-בשנייה, במישור ניצב לקווי הכוח. במקרה זה יחתוך התייל את כלל קווי הכוח, המצויים בחתך ניצב של השדה, אשר שיטחו 1 מ"ר.

מספר קווי כוח אלה מבוטא על-ידי צפיפות השטף המגנטי (B), שאינה אלא מספר קווי הכוח העוברים דרך שטח של 1 מ"ר. ואם המהירות אינה 1 מטר - בשניה, אלא (v) מטרים בשניה, ואורך התייל אינו 1 מטר, אלא (ℓ) מטרים - יהיה הכא"מ המושרה (E):

$$E = Bv\ell$$

E : הכא"מ המושרה בוולטים [V]

B : צפיפות השטף המגנטי ביחידות ובר-למ"ר [Wb/m^2]

v : מהירות התנועה של התייל במטרים-בשנייה [m/sec]

ℓ : אורך המוליך במטרים [m]

דוגמא: תייל, שאורכו 20 ס"מ, נע במהירות של 0.5 מטרים-בשנייה בתוך שדה אחיד, שצפיפות השטף בו היא 1.2 ובר-למ"ר.
חשב את ערכו של הכא"מ המושרה בתייל.

$$E = Bv\ell = 1.2 \times 0.5 \times 20 \times 10^{-2} = 0.12V$$

אם נשנה את נרשא הנוסחא האחרונה, נבטא את (B), ונציב את היחידות, נקבל כינוי נוסף ליחידת צפיפות השטף:

$$B = \frac{E}{v\ell} \; ; \qquad \frac{V}{[m/sec]\ [m]} = \left[\frac{V\ sec}{m^2}\right]$$

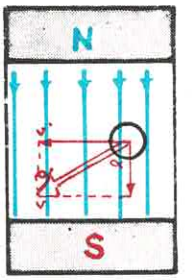
מצאנו, אם כן, שהכינוי של יחידת צפיפות-השטף היא $[Vsec/m^2]$ או וולט-שנייה למ"ר. לכן:

$$[Wb/m^2] = [V\ sec/m^2]$$

ומזה נובע גם כינוי נוסף ליחידת השטף המגנטי (Φ) :

$$[Wb] = [V\ sec]$$

אם התייל אינו נע בניצב לקווי הכוח, אלא בזווית (α) כלפי קווי הכוח, עלינו לקחת בחשבון את רכיב המהירות (v') , אשר כיוונו ניצב לקווי הכוח (ציור ט"ז5).



ציור ט"ז5

נוכל, אם כן, לרשום: $E = Bv'\ell$

לפי ציור ט"ז5: $v' = v \sin\alpha$

לכן:

$$\boxed{E = Bv\ell \sin\alpha}$$

E : הכא"מ המושרה במוליך הנע בשדה מגנטי בוולטים [V]

B : צפיפות השטף ביחידות ובר-למ"ר או וולט-שניות למ"ר $\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$; $\left[\frac{V\ sec}{m^2}\right]$

v : מהירות התנועה של התייל במטרים-בשנייה [m/sec]

ℓ : אורך התייל במטרים [m]

α : הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין קווי הכוח המגנטיים [°]

דוגמא: תייל שאורכו 50 ס"מ נע, בשדה מגנטי אחיד, במהירות של 2 מטרים בשנייה, בזווית בת 30° כלפי קווי הכוח. חשב את הכא"מ המושרה, אם צפיפות השטף המגנטי היא 0.1 וולט-שניות למ"ר.

$$E = Bv\ell \sin\alpha = 0.1\times2\times0.5\times\sin 30° = 0.1\times0.5 = 0.05V$$

אם תייל נע בשדה מגנטי בזוית בת 90° , כלפי קווי הכוח, מקבלים:

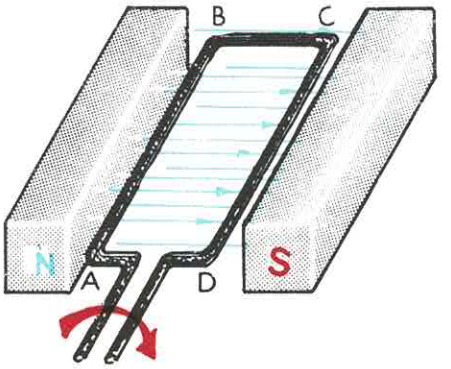
$$\sin 90° = 1$$

לכן הכא"מ המושרה בתייל במקרה פרטי זה יהיה כפי שכבר מצאנו:

$$E = Bv\ell$$

כריכה מסתובבת בשדה מגנטי

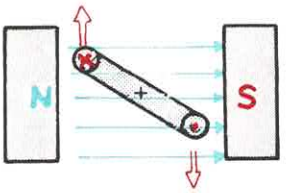
בציור ט"ז6 מתוארת כריכה הנעה בשדה מגנטי. אם נתבונן בציור, נראה, כי הקטעים AB ו- CD חותכים קווי כוח מגנטיים, ולעומתם הקטעים BC ו- DA אינם חותכים קווי כוח מגנטיים, הואיל ותנועתם היא במקביל לקווי הכוח.



ציור ט"ז6

נבדוק עתה את כיוון הכא"מ, המושרה בכל אחד מהקטעים AB ו- CD , באמצעות כלל כף היד הימנית (ציור ט"ז7).

אנו רואים, כי בקטע DC הכיוון הוא מ- C ל- D , ובקטע AB מ- A ל- B . המסקנה הנובעת מכך היא, כי הכוחות-האלקטרו-מניעים מצטרפים לכא"מ שקול השווה לסכומם.



ציור ט"ז7

כפי שראינו, הכח האלקטרו-מניע המושרה בתייל נושא זרם, הנע בשדה מגנטי אחיד, בזווית קבועה (α) הוא:

$$E = Bv\ell \sin\alpha$$

במקרה של כריכה מסתובבת בשדה מגנטי, הזווית α משתנה, ומסיבה זו הכא"מ ישתנה, כך שיש להתייחס ל כ א " מ ר י ג ע י אשר ערכו משתנה עם שינוי הזווית (α) .

לכן יהיה הכא"מ הריגעי השקול, המושרה בכריכה המסתובבת, בשדה מגנטי אחיד:

$$\boxed{e = 2Bv\ell \sin\alpha}$$

e : הכא"מ הריגעי המושרה בכריכה מסתובבת בשדה מגנטי אחיד בוולטים [V]

B : צפיפות השטף המגנטי ביחידות וולט-שניות למ"ר [V sec/m^2]

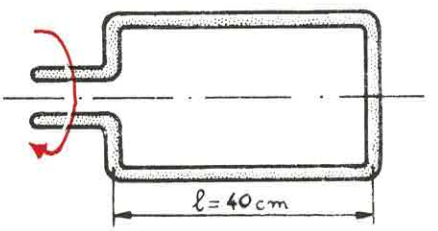
v : מהירות הסיבוב של הכריכה ביחידות מטרים-בשניה [m/sec]

ℓ : אורך הכריכה במטרים [m]

α : הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין כיוון השדה המגנטי [°]

דוגמא: כריכה מלבנית, שאורכה 40 ס"מ (ציור ט"ז8), מסתובבת במהירות של 12 מטרים בשנייה בשדה מגנטי אחיד בעל צפיפות שטף של 0.1 וולט שניות. חשב את ערך הכא"מ המושרה בכריכה, כאשר כיוון התנועה הוא בזווית בת 90° כלפי קווי הכוח.

$$e = 2Bv\ell \sin\alpha = 2\times0.1\times12\times0.4\times\sin 90° = 0.96V$$



ציור ט"ז8

אם רוחב הכריכה הוא d והיא מסתובבת סביב צירה, תהיה הדרך שעובר כל קטע פעיל, בסיבוב אחד של הכריכה, שווה להיקף πd . אם הכריכה מבצעת n סיבובים בשנייה, הרי שבשנייה אחת יעבור כל קטע פעיל של הכריכה את הדרך πdn . הואיל והדרך, שגוף עובר בפרק זמן של שנייה אחת, מבוטאת על-ידי המהירות, נוכל לרשום:

$$v = \pi dn$$

אם נציב ביטוי זה בתוך נוסחאת הכא"מ, נקבל:

$$e = 2\pi Bd\ell n \sin\alpha$$

המכפלה $d\ell$ מבטאת את שטח הכריכה A , ומסיבה זו נוכל לרשום:

$$\boxed{e = 2\pi BAn \sin\alpha}$$ או: $$\boxed{e = 2\pi\Phi n \sin\alpha}$$

e : הכא"מ הריגעי המושרה בכריכה המסתובבת בשדה מגנטי אחיד, בוולטים [V]

B : צפיפות השטף המגנטי ביחידות וולט-שניות למ"ר [V sec/m^2]

A : שטח הכריכה במ"ר , [m^2]

n : מספר הסיבובים שמבצעת הכריכה בשנייה אחת [1/sec]

α : הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין כיוון השדה המגנטי [°]

Φ : שיעור השטף החודר דרך הכריכה בוובר [Wb] או וולט-שניות [V sec]

דוגמא: כריכה, שאורכה 40 ס"מ ורוחבה 25 ס"מ, מסתובבת בתוך שדה מגנטי אחיד, שצפיפות השטף שלו היא 0.1 וולט-שנייה למ"ר.
חשב את הכא"מ הריגעי, המושרה בכריכה, כאשר הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין כיוון השדה היא 30° , אם הכריכה מבצעת 10 סיבובים בשנייה.

$$e=2\pi BAn \sin\alpha=6.28\times0.1\times25\times40\times10^{-4}\times10\times0.5 = 0.314V$$

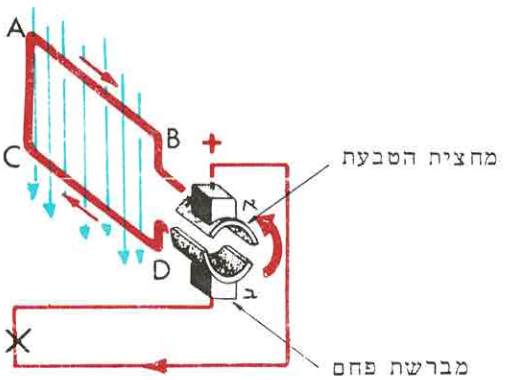
אם בשדה המגנטי מסתובב סליל מלבני, יהיה הכא"מ המושרה בו גדול פי N מהכא"מ המושרה בכריכה אחת, והנוסחאות האחרונות יקבלו את הצורה:

$$\boxed{e = 2\pi NBAn \sin\alpha}$$ או: $$\boxed{e = 2\pi N\Phi n \sin\alpha}$$

עקרון הפעולה של המחולל

המחולל פועל על עקרון הכריכה המסתובבת בתוך שדה מגנטי.

במחולל לזרם ישר מחוברת אל הכריכה טבעת חצויה בדומה למנוע לזרם ישר. הכא"מ מופק מהכריכה באמצעות שתי מברשות פחם המחוברות לעומס (ציור ט"ז9). במצב המתואר בציור זורם הזרם החשמלי מהנקודה A אל הנקודה B , ודרך המברשת א׳ אל הצרכן.



ציור ט"ז9

כפי שראינו מחשבים את הכא"מ הריגעי, המושרה בכריכה, באמצעות הנוסחא:

$$e = 2Bv\ell \sin\alpha$$

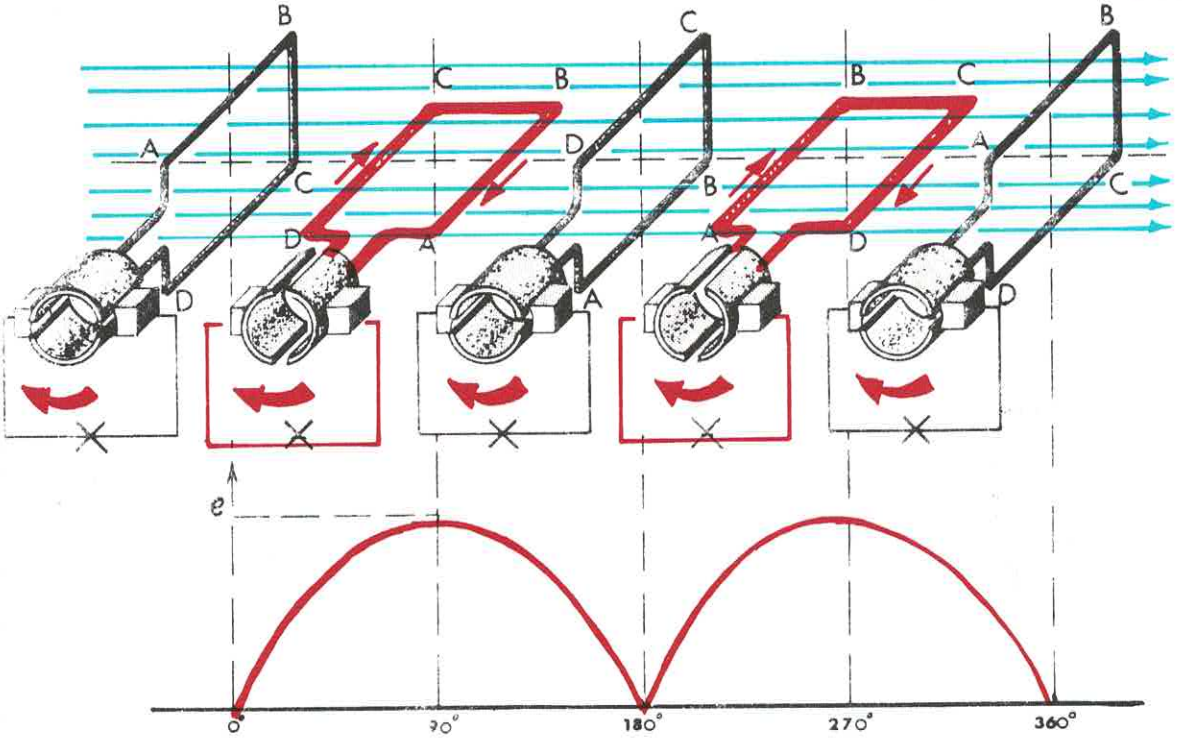
אם הכריכה המסתובבת בשדה אחיד (B קבוע), ובמהירות קבועה, יהיה הכא"מ המושרה תלוי בזוית (α) בין כיוון התנועה לבין כיוון השדה המגנטי.

כאשר $\alpha=0$, ערך הכא"מ המושרה יהיה $e=0$ ובמעגל לא יזרום זרם חשמלי. כאשר $\alpha=90°$, ערכו של הכא"מ הוא מירבי והזרם זורם מהנקודה B אל הנקודה A ודרך המברשת א׳ אל הצרכן.

כאשר $\alpha=180°$, שוב אין זרימת זרם במעגל, הואיל והכריכה אינה חותכת קווי כוח

במצב $\alpha=270°$ דרך הקטע CD זורם הזרם בכיוון מ-C ל- D ודרך המברשת א׳ אל הצרכן.

אנו רואים, כי למרות שכיוון הזרם, בכל קטע, משנה מגמתו בכל חצי סיבוב, דרך הצרכן זורם הזרם החשמלי באותו הכיוון, הודות לטבעת החצויה.



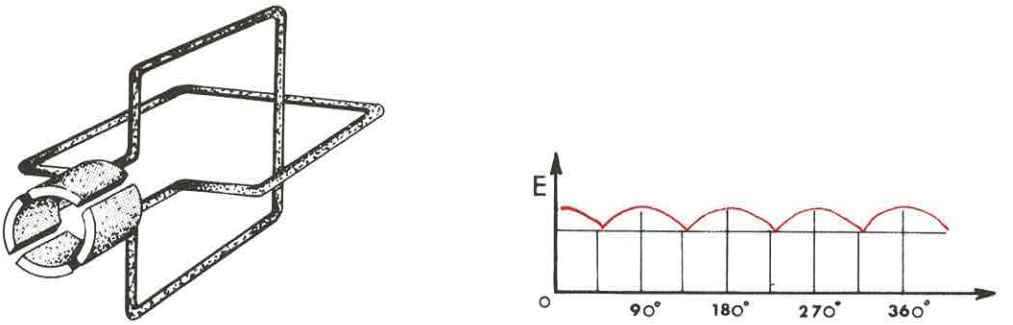
ציור ט"ז10

מחולל זה קרוי מחולל לזרם ישר, הואיל ובכל מקרה הכא"מ בין שתי המברשות הוא באותה מגמה, וכתוצאה מכך גם הזרם הזורם בצרכן הוא באותה מגמה. אך כפי שאנו רואים באפיין, המתואר בציור ט"ז10, משנה הכא"מ את ערכו מאפס ועד (e), פעמיים בכל סיבוב, וכמו כן גם הזרם, הזורם דרך הצרכן, ישנה את עוצמתו מאפס ועד לערך מסויים. מסיבה זו, אין מסתפקים בטבעת חצויה, אלא מחלקים את הטבעת לקטעים רבים. ואל כל זוג קטעים המצויים זה מול זה, מחוברת כריכה.

בציור ט"ז11 מתואר עוגן בעל שתי כריכות. אנו רואים, שהכא"מ אינו משנה את ערכו במידה רבה. ככל שנוסיף כריכות – כן ישתנה הכא"מ במידה פחותה.

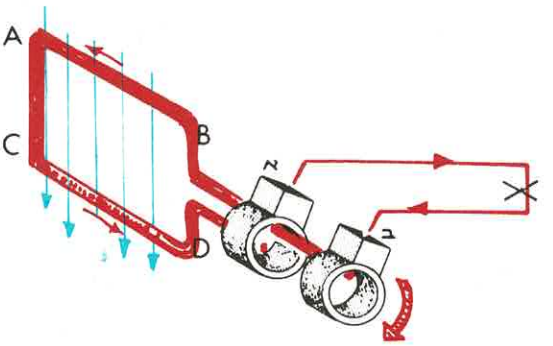
במחוללים שבמציאות אין מסתפקים בכריכות בודדות, אלא משתמשים בסלילים, על מנת שהכא"מ המופק יהיה גבוה יותר.

במחוללים לזרם חילופין אין משתמשים בטבעות מקוטעות, אלא בשתי טבעות שלמות, אשר כל אחת מהן מחוברת לקצה אחר של הכריכה. הכא"מ המופק הוא כא"מ חילופין, ודרך צרכן המחובר לטבעות אלה, באמצעות מברשות, יזרום זרם חילופין. במצב המתואר בציור



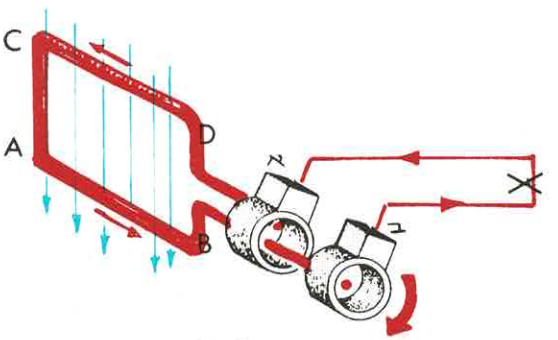
ציור ט"ז11

ט"ז12 זורם הזרם החשמלי ממברשת א׳ אל מברשת ב׳ דרך הצרכן.



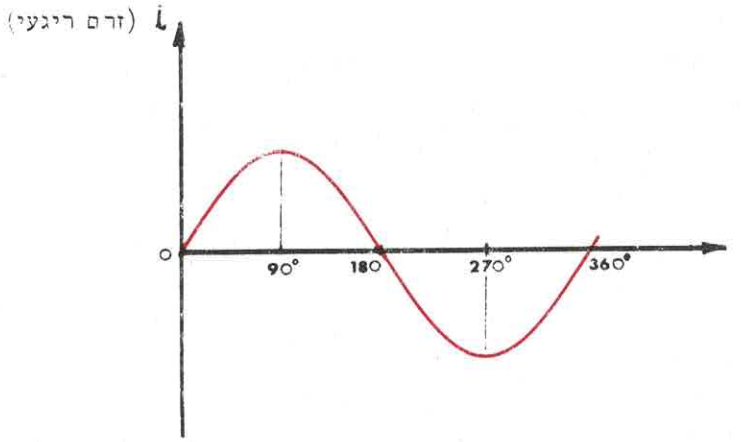
ציור ט"ז12

בציור ט"ז13 מתוארת אותה המערכת, לאחר ביצוע מחצית הסיבוב. אנו רואים, כי הזרם זורם בכיוון הפוך. במצב זה זורם הזרם ממברשת ב׳ אל מברשת א׳ דרך הצרכן.



ציור ט"ז13

ראינו, אם כן, כי הזרם משנה כיוונו בכל מחצית הסיבוב, ותאורו הגרפי יהיה כמתואר בציור ט"ז14.



ציור ט"ז14

נסתפק בספרנו זה בתאור עקרון הפעולה של המחולל ולא ניכנס לפרטי המבנה והפעולה של מחוללים שבמציאות.

כא"מ המושרה במוליך עקב שינוי השטף המגנטי

כפי שראינו, בפרק זה, ניתן לחשב את ערכו של כא"מ מושרה במוליך נע, בשדה מגנטי אחיד, בניצב לקווי הכוח, באמצעות הנוסחא:

$$E = Bv\ell$$

מהירות התנועה של התייל (v) אינה אלא היחס בין הדרך (s) שהוא עובר לבין פרק הזמן (t) הדרוש כדי לעבור לאורך דרך זו.

נוכל לרשום:

$$v = \frac{s}{t}$$

אם נציב ביטוי זה בתוך הנוסחא האחרונה, נקבל:

$$E = \frac{B\ell s}{t}$$

המכפלה ℓs מציינת את השטח (A) , אשר כיסה המוליך, תוך תנועתו בשדה המגנטי (ציור ט"ז15).

אי לכך, נוכל לרשום:

$$E = \frac{BA}{t}$$

כזכור, המכפלה BA מציינת את השטף (Φ) , לכן מקבלים:

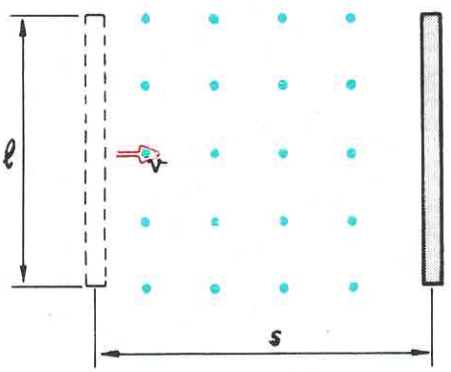
$$\boxed{E = \frac{\Phi}{t}}$$

E : הכא"מ המושרה במוליך נע בשדה מגנטי בוולטים [V]

Φ : השטף המגנטי, שהמוליך חותך תוך תנועתו בוולט-שניות [V sec]

t : משך זמן התנועה בשניות [sec]

אנו רואים שהכא"מ המושרה במוליך, הנע בשדה מגנטי וחותך שטף בשעור (Φ) , תוך פרק זמן (t) , נמצא ביחס ישר לשטף שהוא חותך וביחס הפוך למשך זמן התנועה.



ציור ט"ז15

דוגמא: תייל מוליך נע בשדה מגנטי אחיד, בניצב לכיוון השדה.
חשב את הכא"מ המושרה בתייל, אם במשך פרק זמן של 0.1 שנייה הוא חתך שטף בשיעור 5×10^{-2} וולט-שניות.

$$E \cdot \frac{\Phi}{t} = \frac{5 \times 10^{-2}}{10^{-1}} = 0.5V$$

לאחר מספר נסיונות שביצע קבע פרדיי, כי בכל מקרה של שינוי שטף, באזור בו נמצא המוליך, יושרה בו כא"מ אשר יהיה יחסי למהירות שינוי השטף.

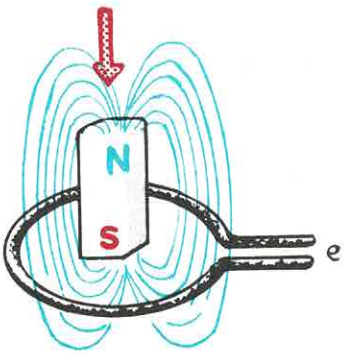
נוכל לבטא את הקביעה של פרדיי הקרויה חוק פרדיי, או משפט פרדיי, באמצעות הנוסחא הבאה:

$$\boxed{E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

E	: הכא"מ הממוצע המושרה במוליך בוולטים	[V]
$\Delta\Phi$	: שיעור השינוי בשטף המגנטי בוולט-שניות	[V sec]
Δt	: פרק הזמן, בו חל השינוי בשטף, בשניות	[sec]

אנו רואים, שככל שהשינוי בשטף גדול יותר ומשך השינוי קצר יותר, יהיה ערך הכא"מ המושרה במוליך גדול יותר.

אנו מתייחסים כאן למקרים, בהם המוליך הוא קבוע והשדה המגנטי, בו הוא שרוי, הוא המשתנה. שדה מגנטי משתנה, ניתן ליצור על-ידי כך שנניע מגנט או אלקטרומגנט באופן שקווי הכוח שהם יוצרים יחתכו את המוליך (ציור ט"ז16).



ציור ט"ז16

כתוצאה מכך, יושרה בכריכה כא"מ ממוצע, שערכו יהיה:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

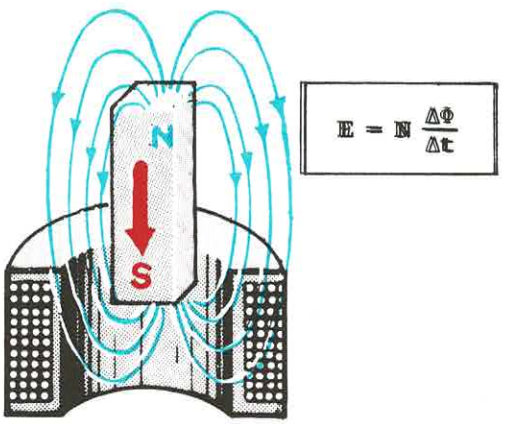
אם משך זמן השינוי הוא קצר מאד, ניתן לראות את המתח הממוצע E כמתח ריגעי.

דוגמא: כריכה נתונה בשדה מגנטי אחיד וקבוע, שערך השטף שלו הוא 8×10^{-3} וולט שניות. באופן פתאומי חלה ירידה בערך השטף, ותוך פרק זמן של 0.1 שנייה ירד ל- 2×10^{-3} וולט שניות.

חשב את ערך הכא"מ הממוצע המושרה בכריכה.

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{8\times10^{-3}-2\times10^{-3}}{0.1} = \frac{6\times10^{-3}}{10^{-1}} = 6\times10^{-2}V$$

אם נניע מגנט או אלקטרומגנט בקירבת סליל בעל N כריכות, ערך הכא"מ הממוצע שיושרה בו יהיה גדול פי N מהכא"מ המושרה בכריכה אחת (ציור ט"ז17).



ציור ט"ז17

ככל שיתקרב המגנט אל הסליל, כן יגדל השטף דרכו, וככל שמהירות התנועה תגדל, כן יגדל מספר קווי הכוח, החותכים את הכריכות ביחידת זמן. מגמתו של הכא"מ המושרה תלויה בכיוון שינוי השטף, וערכו תלוי, כפי שראינו, בקצב שינוי השטף.

אין זה משנה, אם השטף גדל או קטן, בשני המיקרים יושרה כא"מ, הואיל והגורם היוצר את הכא"מ הוא שינוי השטף.

יש עוד להוסיף ולומר, כי אם הסליל מהווה חלק ממעגל חשמלי סגור, יזרום במעגל זרם חשמלי, אשר ייצור שטף מגנטי המתנגד לשינוי השטף המקורי, וזאת בהתאם לחוק לנץ.

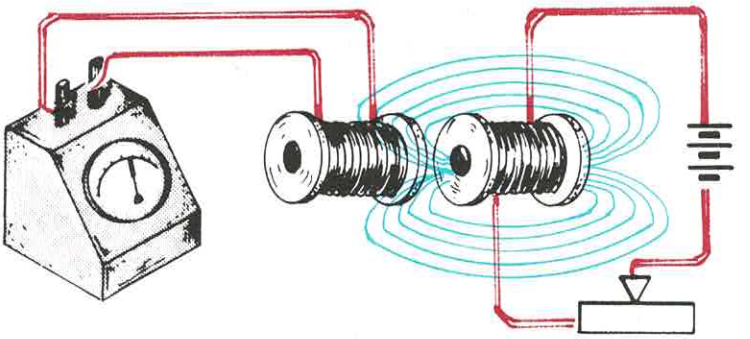
דוגמא: דרך סליל, בעל 1000 כריכות, חדר שטף, אשר ערכו השתנה מ- 2×10^{-3} וולט-שניות עד 4×10^{-3} וולט שניות בפרק זמן של אלפית השנייה.
חשב את ערכו של הכא"מ הממוצע אשר הושרה בסליל.

$$E = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 1000\,\frac{4\times10^{-3}-2\times10^{-3}}{10^{-3}} = 1000\times2 = 2000V$$

דוגמא: דרך סליל, בעל 25 כריכות, חדר שטף, אשר ערכו השתנה מ- 20×10^{-3} וולט-שניות עד 14×10^{-3} וולט-שניות בפרק זמן של 3 אלפיות השנייה.
חשב את ערכו של הכא"מ אשר הושרה בסליל.

$$E = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 25\,\frac{20\times10^{-3}-14\times10^{-3}}{3\times10^{-3}} = \frac{25\times6}{3} = 50V$$

שיטה נוספת של שינוי שטף היא על-ידי הזרמת זרם בעל עוצמה משתנה דרך סליל. את עוצמת הזרם ניתן לשנות על-ידי הכנסת ראוסטט במעגל, או על-ידי הזרמת זרם חילופין בסליל. במוליך ישר, או בכריכה, או בסליל, המצויים בשדה מגנטי זה, יווצר כא"מ אשר את ערכו ניתן לחשב בכפיפות לחוק פרדיי ואת מגמתו ניתן לקבוע בכפיפות לחוק לנץ (ציור ט"ז18).



ציור ט"ז18

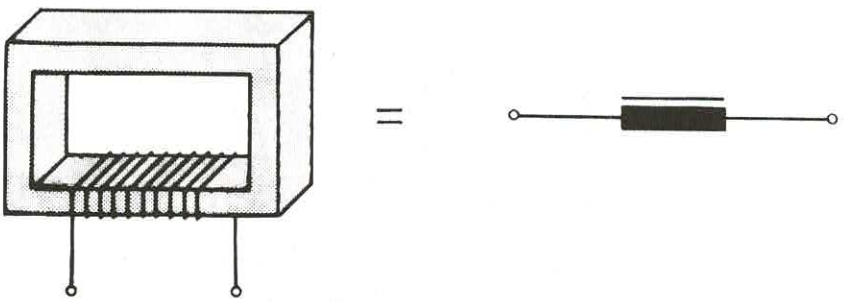
השראה עצמית

אם נחבר סליל למקור מתח ישר, יזרום דרך הסליל זרם ישר, אשר עוצמתו תלויה בכא"מ של המקור ובהתנגדות המעגל. אם דרך אותו סליל נזרים זרם שעוצמתו משתנה, יווצר שטף, אשר בהתאם לחוק לנץ ישרה בסליל כא"מ, שמגמתו הפוכה למגמת שינוי הזרם. תופעה זו קרוייה ה ש ר א ה ע צ מ י ת, והכא"מ המושרה קרוי כא"מ של השראה עצמית.

לפי חוק לנץ יוצר כא"מ של השראה עצמית זרם, שמגמתו הפוכה למגמת שינוי הזרם בסליל. הווה אומר: אם עוצמת הזרם עולה, מגמת הכא"מ המושרה תהיה כזו שתזרים זרם בכיוון הפוך לכיוון הזרימה של הזרם המקורי. לעומת זאת, אם עוצמת הזרם יורדת, מגמת הכא"מ המושרה תהיה כזו שתזרים זרם בכיוון הזרם המקורי.

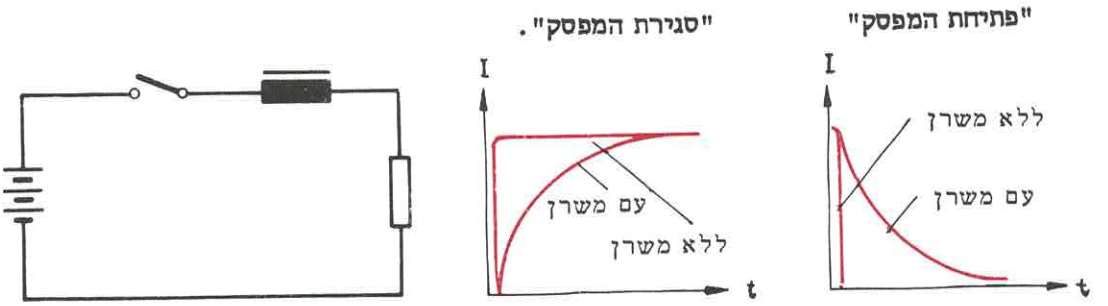
ה מ ש ר ן

המשרן הוא סליל, הכרוך על ליבת ברזל, ותפקידו במעגל חשמלי הוא להתנגד לשינויים בזרם החשמלי הזורם במעגל (ציור ט"ז19).



ציור ט"ז19

נתייחס למעגל שבציור ט"ז20. מעגל זה מורכב מקור מתח, צרכן כלשהו, משרן ומפסק. בעת פתיחת המפסק וסגירתו, במעגל דומה, ללא משרן, עולה עוצמת הזרם לערכה המירבי או יורדת לאפס בבת אחת. לעומת זאת, אם קיים משרן במעגל, הוא מתנגד לשינוי הפתאומי, ועוצמת הזרם במעגל עולה או יורדת בהדרגה.



ציור ט"ז20

שימוש נוסף של משרנים, במעגלים חשמליים, הוא ביטול תנודות אפשריות בזרם החשמל.

מקדם ההשראה העצמית (השראות)

מקדם ההשראה העצמית הקרוי **השראות**, אשר נהוג לסמנה (L) , מאפיינת את הנתונים של הסליל או המשרן והיא תלויה במספר הכריכות ובמיאון של הליבה.

יחידת ההשראות היא "הנרי" וסימונה [H] .

יחידת ההשראות של משרן היא 1 הנרי, אם שינוי עוצמת הזרם, הזורם בסליל, בשיעור אמפר אחד בשנייה, יגרום לכא"מ מושרה של וולט אחד.

נוכל לרשום עתה את הקשר בין הכא"מ הממוצע המושרה (E) לבין ההשראות ולבין קצב שינוי עוצמת הזרם:

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

E : הכא"מ הממוצע,המושרה במשרן או בכל סליל אחר, בוולטים [V]

L : ההשראות בהנרי [H]

ΔI : שיעור שינוי עוצמת הזרם באמפרים [A]

Δt : משך זמן השינוי בשניות [sec]

דוגמא: עוצמת הזרם, במעגל חשמלי, השתנתה בשיעור 2 אמפר בפרק זמן של מאית השנייה. חשב את ערכו של הכא"מ הממוצע, אשר הושרה במשרן, המחובר במעגל, אם ההשראות שלו היא 5 הנרי.

$$E = L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 5\,\frac{2}{10^{-2}} = 1000V$$

אם משך זמן השינוי הוא קצר מאד, ניתן לראות את המתח הממוצע E כמתח ריגעי.

יש לשים לב לכך שבמעגלים חשמליים, הכוללים משרנים או כל רכיב אחר בעל השראות, עשויים להופיע מתחים ריגעיים גבוהים מאד בעת חיבור או ניתוק זרם החשמל.

מצאנו, אם כן, שהכא"מ הממוצע (E), הנוצר במשרן, נמצא ביחס ישר להשראות (L) וביחס ישר לקצב שינוי הזרם $(\Delta I/\Delta t)$.

$$E = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

לפי חוק פרדיי, נמצא המתח הממוצע, הנוצר כתוצאה מהשראה, ביחס ישר למספר הכריכות (N) וביחס ישר לקצב שינוי השטף $(\Delta\Phi/\Delta t)$.

$$E = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

אם נשווה את שני הביטויים האחרונים זה לזה, נקבל:

$$L\frac{\Delta I}{\Delta t} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

נבטא את L מתוך הנוסחא האחרונה:

$$L = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta I}$$

לפי נוסחאת הופקינסון למעגלים מגנטיים, (ראה פרק י"ד):

$$\Phi = \frac{NI}{\ell/\mu_o\mu_r A}$$

כאשר מדובר בשינוי שטף $(\Delta\Phi)$ כתוצאה של שינוי עוצמת הזרם בשיעור (ΔI), נקבל:

$$\Delta\Phi = \frac{N\Delta I}{\ell/\mu_o\mu_r A}$$

או:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta I} = \frac{N\mu_o\mu_r A}{\ell}$$

אם נציב ביטוי זה בנוסחא האחרונה שקיבלנו לחישוב מקדם ההשראות, נקבל:

$$\boxed{L = \frac{N^2 A\mu_o\mu_r}{\ell}}$$

L : ההשראות בהנרי $[\dot{H}]$

N : מספר הכריכות במשרן

A : שטח החתך של הליבה במ"ר $[m^2]$

μ_o : חלחלות האוויר ביחידות ובר לאמפר-כריכות למטר $[Wb/AT\times m]$

μ_r : החלחלות היחסית של החומר ממנו עשויה הליבה

ℓ : אורך המסלול המגנטי במטרים $[m]$

דוגמא חשב את ההשראות של משרן בעל 600 כריכות, הכרוכות על גבי ליבה עשויה פלדה, בעלת חלחלות יחסית 1000. שטח החתך של הליבה הוא 5 סמ"ר, ואורך המסלול הממוצע של המעגל המגנטי הוא 25 ס"מ.

$$L = \frac{N^2 A\mu_o\mu_r}{\ell} = \frac{600^2\times5\times10^{-4}\times4\pi\times10^{-7}\times10^3}{25\times10^{-2}} \cong 0.9H$$

חישוב שיעור השטף המתפתח בסליל

כפי שראינו:

$$L = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta I}$$

או:

$$\Delta\Phi = \frac{L}{N}\Delta I$$

פרוש הנוסחא הוא, ששינוי עוצמת זרם בשיעור ΔI , בסליל בעל (N) כריכות והשראות (L) , יגרום לשינוי שטף בשיעור $\Delta\Phi$.

נובע מזה שעוצמת זרם קבועה בשיעור (I) , בסליל בעל (N) כריכות והשראות (L) , תגרום לשטף קבוע בשיעור (Φ) .

$$\boxed{\Phi = \frac{LI}{N}}$$

דוגמא: מהו השטף המתפתח בסליל בעל 1000 כריכות והשראות של 5 הנרי, אם עוצמת הזרם בסליל היא 2 אמפר.

$$\Phi = \frac{LI}{N} = \frac{5 \times 2}{1000} = 0.01Wb$$

ההשראות השקולה של משרנים מחוברים בטור

אם מחברים בטור מספר משרנים, תהיה ההשראות השקולה שלהם שוה לסכום ההשראויות של המשרנים.

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots.$$

דוגמא: שלושה משרנים בעלי השראות 1,3,5 הנרי חוברו בטור.
חשב את ההשראות השקולה.

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 1 + 3 + 5 = 9H$$

דוגמא: מעגל חשמלי מורכב מחמישה משרנים המחוברים בטור. ההשראות של כל משרן היא 10 הנרי.
חשב את הכא"מ הממוצע (Eav) , המושרה במעגל, אם עוצמת הזרם במעגל יורדת מ-20 אמפר לאפס, תוך פרק זמן של 0.1 שניות.

$$L_T = 5L = 5 \times 10 = 50H$$

$$Eav = L_T \frac{\Delta I}{\Delta t} = 50 \times \frac{20}{0.1} = 10000V$$

השראה הדדית

אם שני סלילים מצויים זה ליד זה, ודרך אחד מהם מזרימים זרם שעוצמתו משתנה, יורצר שטף משתנה, אשר ישפיע על הסליל השני וייצור בו כא"מ מושרה (ציור ט"ז18).

השראה מסוג זה קרוייה ה ש ר א ה ה ד ד י ת, והכא"מ הנורצר בסליל השני קרוי כא"מ של השראה הדדית.

נהוג לכנות את הסליל, בו זורם הזרם החשמלי, בשם ס ל י ל ר א ש ו נ י ואת הסליל, בו מושרה הכא"מ של השראה הדדית, בשם ס ל י ל ש נ י י.

מ ק ד ם ה ש ר א ה (ההשראות) ה ה ד ד י ת

לשני סלילים השראות הדדית (M) של הנרי אחד, אם שינוי עוצמת הזרם בסליל הראשוני, בשיעור של אמפר אחד בשנייה, גורם שבסליל השניי מושרה כא"מ בשיעור וולט אחד.

נוכל לרשום:

$$E_2 = M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

E_2 : הכא"מ המושרה בסליל השניי בוולטים [V]

M : ההשראות ההדדית בהנרי [H]

ΔI_1 : שיעור השינוי של עוצמת הזרם בסליל הראשוני באמפרים [A]

Δt : משך זמן השינוי בשניות [sec]

דוגמא: עוצמת הזרם הזורם בסליל השתנתה בשיעור 2 אמפר תוך פרק זמן של עשירית השנייה. חשב את הכא"מ המושרה בסליל שני, אם ההשראות ההדדית בין שני הסלילים היא 0.5 הנרי.

$$E_2 = M\frac{\Delta I_1}{\Delta t} = 0.5 \times \frac{2}{0.1} = 10V$$

שינוי הזרם בסליל הראשוני בשיעור ΔI_1 יורצר שינוי שטף בשיעור $\Delta\Phi_1$.

אילו שני הסלילים היו כרוכים על ליבת ברזל אחת, היו שינויי השטף בסליל השניי גם כן, $\Delta\Phi_1$. אנו מעוניינים לבדוק מקרה, בו שני הסלילים אינם כרוכים על ליבת ברזל,

ומסיבה זו חלק בלבד משינוי השטף, המתפתח בסליל הראשוני, ישפיע על השניי.

נסמן שינוי שטף זה ב- $\Delta\Phi_2$.

לפי פרדיי: $E_2 = N_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t}$

וכפי שראינו: $E_2 = M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$

נשווה את שני הביטויים ונקבל : $N_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} = M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$

ומכאן נובע: $M = N_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta I_1}$

כפי שאמרנו, חלק בלבד משינוי השטף $\Delta\Phi_1$ משפיע על הסליל השניי.

את היחס בין שינוי השטף בסליל השניי לזה שבראשוני אנו מכנים ג ו ר ם ה צ י מ ו ד ומסמנים אותו באות (k) . לכן:

$$\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta\Phi_1} = k$$

או: $\Delta\Phi_2 = k\Delta\Phi_1$

אם נציב זאת בביטוי האחרון שקבלנו, נוכל לרשום:

$$\boxed{M = N_2\frac{k\Delta\Phi_1}{\Delta\Phi_1}}$$

הואיל ו- M הוא מקדם השראה הדדית, הרי גרימה של שינוי זרם בשיעור ΔI_2 , בסליל השניי, תביא לשינוי שטף $\Delta\Phi_1$ בסליל הראשוני, כאשר: $\Delta\Phi_1 = k\Delta\Phi_2$

אי לכך נוכל לרשום:

$$\boxed{M = N_1\frac{k\Delta\Phi_2}{\Delta I_2}}$$

אם נכפול את שתי הנוסחאות האחרונות, זו בזו, ונסדר את האיברים נקבל:

$$M^2 = k^2\frac{N_1\Delta\Phi_1}{\Delta I_1}\frac{N_2\Delta\Phi_2}{\Delta I_2}$$

בסעיף, הדן בהשראה עצמית, ראינו, כי: $L = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta I}$

לכן אפשר לרשום: $L_1 = N_1\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_1}$; $L_2 = N_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta I_2}$

נציב זאת בנוסחא האחרונה ונקבל:

$$\boxed{M^2 = k^2L_1L_2}$$

M : ההשראות ההדדית בין שני סלילים, בהנרי [H]

k : גורם הצימוד בין שני סלילים.

L_1 : ההשראות של הסליל הראשוני, בהנרי [H]

L_2 : ההשראות של הסליל השניי, בהנרי [H]

דוגמא: גורם הצימוד בין שני סלילים הוא $k = 0.1$ ההשראות של הסליל הראשון היא 0.5 הנרי ושל השני גם כן 0.5 הנרי.
חשב את ההשראות ההדדית.

$$M^2 = k^2L_1L_2$$

לכן: $M = \sqrt{k^2L_1L_2} = k\sqrt{L_1L_2} = 0.1\sqrt{0.5\times0.5} = 0.1\times0.5 = 0.05H$

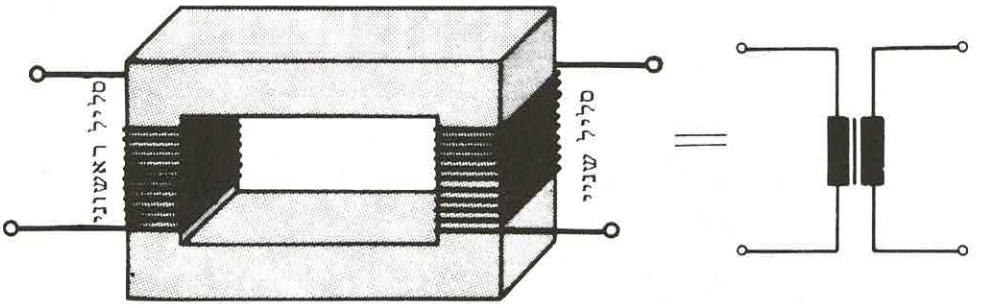
דוגמא: חשב את גורם הצימוד בין שני סלילים, אם ההשראות של כל אחד מהם היא 0.2 הנרי, ומקדם ההשראה ההדדית ביניהם הוא 0.1 הנרי .

$$M^2 = k^2L_1L_2$$

לכן: $k = \sqrt{\frac{M^2}{L_1L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} = \frac{0.1}{\sqrt{0.2\times0.2}} = \frac{0.1}{0.2} = 0.5$

ה ש נ א י (הטרנספורמטור)

השנאי, הפועל על עקרון ההשראה ההדדית, בנוי שני סלילים הכרוכים על ליבת ברזל משותפת (ציור ט"ז21).



ציור ט"ז21

הואיל ושני הסלילים כרוכים על ליבה אחת, ניתן לצאת מתוך הנחה, כי שינוי השטף בסליל השניי יהיה שווה לשינוי השטף בסליל הראשוני:

$$\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2$$

מסיבה זו גורם הצימוד ביניהם הוא $k = 1$.

כפי שראינו בסעיף הקודם, ניתן לבטא את ההשראה ההדדית בין שני סלילים באמצעות הנוסחא:

$$M = N_2\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta I_1}$$

הואיל ובשנאי $\Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_1$ נוכל לרשום:

$$M = N_2\ \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_1}$$

לפי נוסחאת הופקינסון, למעגלים מגנטיים (ראה פרק י"ד):

$$\Phi = \frac{NI}{\ell/\mu_o\mu_r A}$$

במקרה שלנו, אם נתייחס לשטף הנוצר על-ידי הסליל הראשוני של השנאי, נוכל לרשום:

$$\Phi_1 = \frac{N_1 I_1}{\ell/\mu_o \mu_r A}$$

כאשר מדובר בשינוי שטף $(\Delta\Phi_1)$ כתוצאה של שינוי עוצמת הזרם בשיעור (ΔI_1) נקבל:

$$\Delta\Phi_1 = \frac{N_1 \Delta I_1}{\ell/\mu_o \mu_r A}$$

או:

$$\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_1} = \frac{N_1 \mu_o \mu_r A}{\ell}$$

אם נציב ביטוי זה בנוסחא האחרונה שקבלנו, לחישוב ההשראות ההדדית, נקבל:

$$\boxed{M = \frac{N_1 N_2 \mu_o \mu_r A}{\ell}}$$

M : ההשראות ההדדית של השנאי בהנרי [H]

N_1 : מספר הכריכות בסליל הראשוני של השנאי

N_2 : מספר הכריכות בסליל השניי של השנאי

μ_o : חלחלות האוויר ביחידות ובר לאמפר-כריכות למטר [Wb/AT×m]

μ_r : החלחלות היחסית של החומר ממנו עשויה הליבה

ℓ : אורך המסלול המגנטי במטרים [m]

דוגמא: חשב את ההשראות ההדדית של שנאי, אם מספר הכריכות בסליל הראשוני הוא 1000 ובשניי 2000.

החלחלות היחסית של הברזל היא 500, שטח חתך הליבה 20 סמ"ר ואורך המסלול המגנטי 31.4 ס"מ.

$$M = \frac{1000\times2000\times4\times3.14\times10^{-7}\times500\times20\times10^{-4}}{31.4\times10^{-2}} = 8H$$

כפי שכבר ראינו: $M = N_1 \frac{k\Delta\Phi_2}{\Delta I_2}$; $M = N_2 \frac{k\Delta\Phi_1}{\Delta I_1}$

הואיל ובשנאי $k=1$ ו- $\Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_1$ נוכל לרשום:

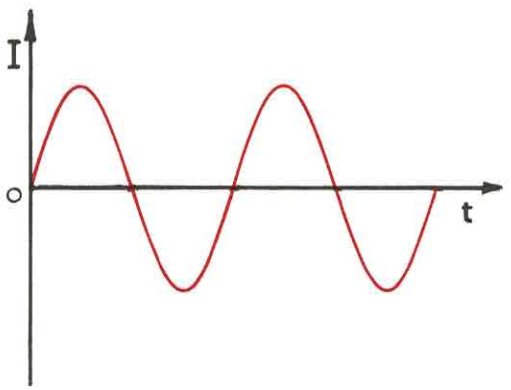
$$M = N_1 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_2} \quad ; \quad M = N_2 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_1}$$

נשווה את שני הביטויים זה לזה ונקבל:

$$N_2 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_1} = N_1 \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta I_2}$$

ומכאן מקבלים: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{\Delta I_1}{\Delta I_2}$

השנאי הוא מכשיר, אשר משתמשים בו בזרם חילופין. כפי שראינו, זרם חילופין משתנה מ-0 עד לערך מסויים, חוזר ל-0, זורם בכיוון הפוך, ושוב חוזר לאפס (ציור ט"ז22).



ציור ט"ז22

אם ניקח בחשבון, כי השינוי בסליל הראשוני הוא מ-0 עד לערך כלשהו I_1 , הרי שהשינוי יהיה: $\Delta I_1 = I_1$

באופן דומה: $\Delta I_2 = I_2$

לכן נוכל לרשום: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$

או:

$$\boxed{I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1}$$

אנו רואים, כי יחס הזרמים בשנאי הוא הפוך ליחס הכריכות, ומסיבה זו ניתן להיעזר בשנאי כמגבר זרם.

דוגמא: בסליל הראשוני של שנאי, הכרוך 1000 כריכות, זורם זרם בעוצמה של 5 אמפר. חשב את עוצמת הזרם, הזורם בסליל השניי, אם הוא כרוך 500 כריכות ומהווה חלק של מעגל חשמלי.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{1000}{500} \times 5 = 2 \times 5 = 10A$$

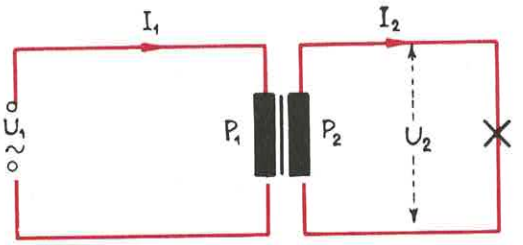
אם מספר הכריכות בסליל השניי גבוה מזה שבסליל הראשוני, תהיה עוצמת הזרם הזורם בסליל השניי, נמוכה מזו שבסליל הראשוני.

דוגמא: בסליל הראשוני של שנאי, הכרוך 200 כריכות זורם זרם בעוצמה של 6 אמפר. חשב את עוצמת הזרם, הזורם בסליל השניי, אם הוא כרוך 500 כריכות ומהווה חלק של מעגל חשמלי.

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1 = \frac{200}{500} \times 6 = 2.4A$$

נניח עתה ששנאי מחובר במעגל חשמלי ומוזן במתח חילופין (ציור ט"ז23).

אם נצא מתוך הנחה, שאין הפסדים בשנאי, הרי שההספק, המושקע בסליל הראשוני, יהיה שווה להספק המופק בסליל השניי.



ציור ט"ז23

נוכל לרשום:

$$P_1 = P_2$$

או:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

מזה נובע:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}}$$

מצאנו, אם כן, שיחס המתחים בשנאי הוא הפוך ליחס עוצמות הזרמים.

הואיל וראינו כבר, שיחס עוצמות הזרמים הוא הפוך ליחס הכריכות, היינו:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

נוכל לסכם ולכתוב:

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}}$$

הנחתנו באשר להפסדים בשנאי היתה קרובה מאד למציאות, הואיל ונצילותם של שנאים, מטיב מעולה, היא מאד גבוהה וקרובה ל- : $\eta = 1$.

דוגמא: בהתייחס לציור **ט"ז23**, חשב את המתח המפעיל את הנורה, אם השנאי מוזן במתח 220 וולט. מספר הכריכות בסליל הראשוני הוא 500 ובשניי 250.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

לכן:

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 220 \times \frac{250}{500} = 110V$$

דוגמא: הסליל הראשוני מוזן במתח 220 וולט ועוצמת הזרם הזורם דרכו היא 2 אמפר. חשב את המתח, השורר בין הדקי הסליל השניי, אם עוצמת הזרם דרכו היא 0.5 אמפר.

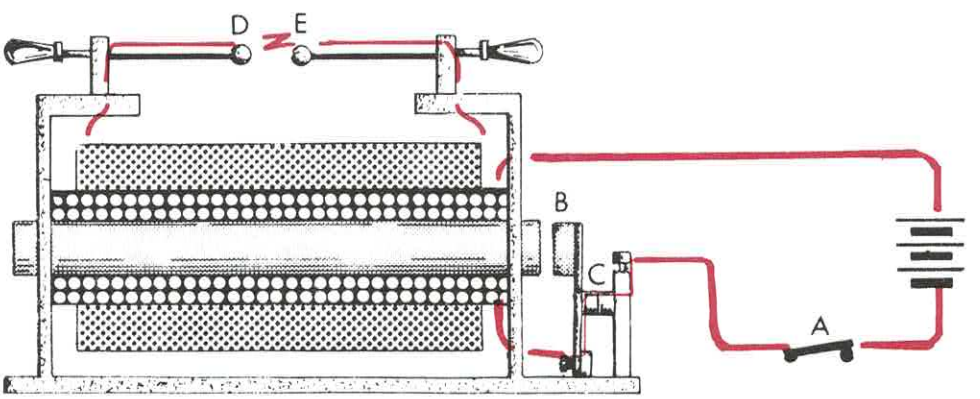
$$U_2 = U_1 \frac{I_1}{I_2} = 220 \times \frac{2}{0.5} = 880V$$

לשנאים שימוש נרחב באלקטרוטכניקה ובחיי יום יום. כידוע, מתח הרשת שלנו הוא 220 וולט בכל חלקי הארץ. בכל מקרה, שנרצה להפעיל צרכן הפועל במתח נמוך או גבוה מ-220 וולט, נהיה נאלצים להיעזר בשנאי. לדוגמא: מכשירים, המיועדים לשימוש בארה"ב, מתוכננים ל-110 וולט, ומסיבה זו, אם נרצה להפעיל בארצנו מכשירים מסוג זה, נהיה נאלצים להיעזר ב ש נ א י מ נ מ י ך, המנמיך את מתח הרשת שלנו מ-220 וולט ל-110 וולט.

כפי שראינו בפרק ו׳, נמצאים ההפסדים בקווים ביחס ישר לריבוע עוצמת הזרם הזורם דרכם. כדי לצמצם את ההפסדים בקווים, בהעברת אנרגיה חשמלית למרחקים, משתמשת חברת החשמל ב ש נ א י ם מ ע ל י מ ת ח ומעבירה את האנרגיה במתח מאד גבוה. באזור, בו מצויים הצרכנים, משתמשים בשנאי-מנמיך, על-מנת שהמתח המסופק להם יהיה בשיעור 220 וולט.

א י נ ד ו ק ט ו ר נ י צ ו צ ו ת

אינדוקטור ניצוצות הוא מכשיר הפועל על עקרון ההשראה ההדדית ומיועד ליצור מתחים גבוהים. הסליל הראשוני של האינדוקטור הוא בעל מספר כריכות נמוך ומוזן בזרם פועם. בסליל השניי מספר רב של כריכות, עשויות תייל דק (ציור ט"ז 24)



ציור ט"ז24

נכיר עתה את מבנה המכשיר ואת עקרון פעולתו:

הסליל הראשוני כרוך על ליבת ברזל רך ועליו כרוך הסליל השניי. הסליל הראשוני מוזן דרך מפסק, המופעל על-ידי השדה המגנטי של הליבה. בין קצות התייל של הסליל השניי מחוברים שני מוטות, אשר בין הקצוות שלהם קופצים הניצוצות. כל המערכת מורכבת על כן עשוי חומר מבדד.

עם סגירת המפסק A נסגר המעגל החשמלי הראשוני, וזרם זורם בסליל הראשוני. כתוצאה מכך מתמגנטת הליבה ומושכת אליה את העוגן B . על-ידי-כך נפתחים המגעים C , זרימת הזרם נפסקת, העוגן B חוזר למקומו, שוב נסגר המעגל החשמלי וחוזר חלילה.

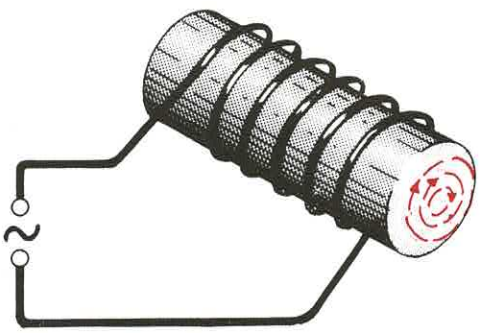
אנו רואים כי בסליל הראשוני זורם זרם פועם. כתוצאה משינויי עוצמת הזרם בסליל הראשוני, מושרה כא"מ בסליל השניי. כא"מ זה תלוי, כפי שראינו, במספר הכריכות בסליל השניי ובקצב שינוי השטף המגנטי, הנוצר על-ידי הסליל הראשוני. הואיל ובסליל השניי מספר רב של כריכות, מושרה בו כא"מ שערכו גבוה, הגורם לפריצת ניצוץ בין הנקודות D ו- E דרך מרווח האוויר המצוי ביניהם.

עקרון הפעולה של אינדוקטור ניצוצות שימושי ברכב לצורך ייצור ניצוצות, הדרושים להצתת התערובת בגלילים.

ז ר מ י מ ע ר ב ו ל ת

כפי שנאמר, גורם שינוי בשטף מגנטי להשראת כא"מ בכל מוליך, הנמצא בתחום השפעת השטף. אי לכך, בכל ליבה, של סליל או שנאי, העשוייה חומר מוליך, ירשרו כוחות-אלקטרו-מניעים, אם יזרום בהם זרם שעוצמתו משתנה.

כוחות-אלקטרו-מניעים אלה יוצרים בליבה זרמים הקרויים ז י ר מ י מ ע ר ב ו ל ת או ז י ר מ י פ ו ק ו. זרמים אלה זורמים בחוגים סגורים בתוך הברזל (ציור ט"ז 25) .



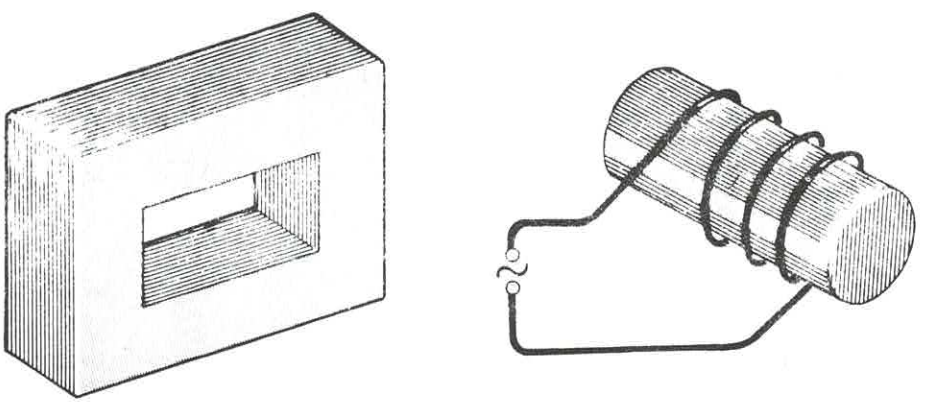
ציור ט"ז 25

זרמי המערבולת גורמים להפסדים, המתבטאים ביצירת חום בליבה.

ההפסדים בליבה תלויים בנפח הליבה, בתדירות הזרם, בצפיפות השטף בליבה, ובהתנגדות הסגולית של הברזל.

אם אין נוקטים באמצעים מתאימים, כדי להחליש את זרמי המערבולת, יהיו ההפסדים במכונות חשמל גדולים, ונצילותם תהיה נמוכה. החום הרב, המתפתח בליבה, עלול אף לגרום נזק לבידוד התילים ולהוציא את המכונה מכלל פעולה.

כדי למנוע הפסדים, הנגרמים כתוצאה מזרמי מערבולת, בונים את הליבות, של מכונות חשמל, מפחי ברזל דקים, המבודדים זה מזה באמצעות לכה. על-ידי-כך מצמצמים את זרמי המערבולת וההפסדים פוחתים (ציור ט"ז 26) .



ציור ט"ז 26

הכרנו עד כאן את הצד השלילי של זרמי מערבולת, ועתה נראה, כי ניתן לנצל תופעה זו למטרות שימושיות:

א) תנורי חימום, כורי היתוך ותנורי חיסום מסויימים פועלים על עקרון ניצול תופעת זרמי המערבולת.

ב) מנועים קטנים, כגון זה המורכב במונה חשמלי, פועלים על עקרון ניצול תופעת זרמי המערבולת.

ג) תופעה זו מנוצלת גם במכשירי מדידה חשמליים שונים.

באופן ניסיוני מצאו, כי את הפסדי ההספק ניתן לחשב באמצעות הנוסחא:

$$P_F = \frac{\pi^2}{6} \frac{v}{\rho} (dfBmax)^2$$

P_F : ההפסדים הנגרמים על-ידי זרמי מערבולת בוטים [W]

v : נפח הברזל במ"ק [m^3]

ρ : ההתנגדות של גוש ברזל (ממנו עשויה הליבה) ששטח חתכו הוא 1 מ"ר ואורכו 1 מ' [Ω×m]

d : עובי-הפחים במטרים [m]

f : תדירות הזרם בהרץ [Hz]

Bmax : צפיפות השטף המירבי ביחידות ובר-למ"ר [Wb/m^2]

אנו רואים, כי ההפסדים, הנגרמים על-ידי זרמי המערבולת, נמצאים ביחס ישר לריבוע עובי הפחים, לריבוע התדירות ולריבוע השטף המירבי.

שאלות סיכום ובעיות לפרק טז

בחן את ידיעותיך

לפניך אוסף שאלות ברירה, ולכל שאלה מספר תשובות, אשר רק אחת מהן נכונה. עליך לבחור את התשובה הנכונה, ולסמן אותה על דף נפרד. לאחר מכן, השוה את תשובותיך עם התשובות המצויות בסוף הספר כדי לקבוע עד כמה מובן לך החומר אשר למדת.

ט"ז1) אם תייל מוליך ישר נע בשדה מגנטי בניצב לקווי הכוח:

א) יושרה בו כוח-אלקטרו-מניע.
ב) מידת החום שלו תעלה.
ג) הוא ירכוש תכונות מגנטיות.
ד) לא יקרה דבר.

ט"ז2) אם תייל מוליך ישר נע בשדה מגנטי במקביל לקווי הכוח:

א) יושרה בו כוח-אלקטרו-מניע.
ב) מידת החום שלו תעלה.
ג) הוא ירכוש תכונות מגנטיות.
ד) לא יקרה דבר.

ט"ז3) אם תייל מוליך ישר נמצא במנוחה בשדה מגנטי קבוע:

א) יושרה בו כוח-אלקטרו-מניע.
ב) מידת החום שלו תעלה.
ג) הוא ירכוש תכונות מגנטיות.
ד) לא יקרה דבר.

ט"ז4) אם מוליך ישר נמצא במנוחה בשדה מגנטי נע, כשקווי הכוח חותכים את המוליך:

א) לא יופיע כא"מ מושרה במוליך.
ב) יופיע כא"מ מושרה במוליך.
ג) יופיע כא"מ מושרה, בתנאי שהמוליך נמצא קרוב לקוטב הצפוני.
ד) יופיע כא"מ מושרה, בתנאי שהמוליך נמצא קרוב לקוטב הדרומי.

ט"ז5) את מגמת הכא"מ המושרה במוליך, החותך קווי-כוח מגנטיים, קובעים באמצעות:

א) כלל הבורג.
ב) כלל היד הימנית.
ג) כלל כף היד הימנית.
ד) כלל כף היד השמאלית.

ט"ז6) **באמצעות כלל כף היד הימנית קובעים:**

א) את מגמת הכא"מ המושרה במוליך, החותך קווי-כוח מגנטיים.

ב) את כיוון הכוח הפועל על מוליך נושא-זרם, בתוך שדה מגנטי.

ג) את כיוון השדה המגנטי, הנוצר סביב מוליך ישר נושא זרם.

ד) את כיוון השדה המגנטי, הנוצר על-ידי סליל נושא זרם.

ט"ז7) **כלל כף היד הימנית קובע:**

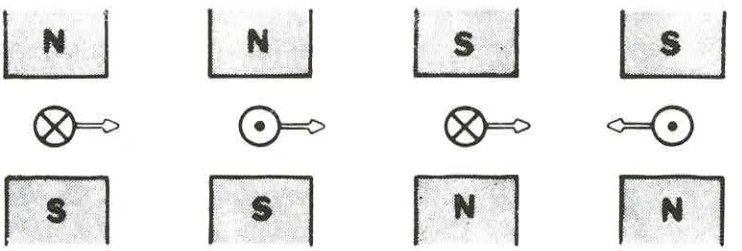
א) אם כף היד פונה בכיוון הקוטב הדרומי, והאגודל מציין את כיוון התנועה של המוליך, יציינו האצבעות את כיוון הכא"מ המושרה.

ב) אם כף היד פונה בכיוון הקוטב הצפוני, והאגודל מציין את כיוון התנועה של המוליך, יציינו האצבעות את כיוון הכא"מ המושרה.

ג) אם כף היד פונה בכיוון הקוטב הדרומי, והאצבעות מציינות את כיוון התנועה של המוליך, יורה האגודל את כיוון הכא"מ המושרה.

ד) אם כף היד פונה בכיוון הקוטב הצפוני, והאצבעות מציינות את כיוון התנועה של המוליך, יורה האגודל את כיוון הכא"מ המושרה.

ט"ז8) **בתרשים שלפניך מציינים החיצים את כיוון התנועה של המוליך.**
קבע איזה הוא התרשים הנכון.



ד) ג) ב) א)

ט"ז9) לפי חוק לנץ יוצר זרם חשמלי, המושרה בתייל, החותך קווי כוח מגנטיים, כוח שמגמתו:

א) מנוגדת למגמת הכוח שגרם להשראה.

ב) בכיוון הכוח שגרם להשראה.

ג) ניצבת למגמת הכוח שגרם להשראה.

ד) בזווית בת 30° כלפי מגמת הכוח שגרם להשראה.

ט"ז10) הכא"מ המושרה במוליך, החותך קווי כוח מגנטיים:

א) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית, לאורך המוליך ולמהירות תנועתו.

ב) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית וביחס הפוך לאורך המוליך ולמהירות תנועתו.

ג) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית, לשטח חתך המוליך ולאורכו.

ד) נמצא ביחס ישר להשראה המגנטית, וביחס הפוך לשטח החתך של המוליך ואורכו.

ט"ז11) בתייל, הנע בשדה מגנטי, יושרה כא"מ מירבי, כאשר הזווית בינו לבין קווי הכוח המגנטיים היא בת:

א)	0°	ג)	45°
ב)	30°	ד)	90°

ט"ז12) ערכו של הכוח-האלקטרו-מניע, המושרה בכריכה מסתובבת בשדה מגנטי אחיד, יהיה מירבי:

א) כאשר מישור הכריכה ניצב לקווי הכוח.

ב) כאשר מישור הכריכה מקביל לקווי הכוח.

ג) כאשר מישור הכריכה יוצר זווית בת 45° עם קווי הכוח.

ד) ערכו של הכוח האלקטרו-מניע אינו תלוי בזווית.

ט"ז13) המחולל פועל על עקרון:

א) תנועת מוליך ישר בתוך שדה מגנטי.

ב) תנועת כריכה בתוך שדה מגנטי.

ג) תנועת מוליך ישר, נושא זרם, בתוך שדה מגנטי.

ד) תנועת כריכה, נושאת זרם, בתוך שדה מגנטי.

ט"ז14) בתוך כריכה, המסתובבת בשדה המגנטי של מחולל, מתעורר כא"מ:

א) שמגמתו מתחלפת בכל מחצית הסיבוב.

ב) שמגמתו מתחלפת בכל סיבוב.

ג) שמגמתו אינה מתחלפת.

ד) שמגמתו תלוייה בטבעות.

ט"ז15) על מנת שבצרכן, המחובר למחולל, יזרום זרם שכיוונו אינו משתנה, עלינו לחברו למחולל באמצעות:

א) מברשות, המחליקות על טבעת אחת.

ב) מברשות, המחליקות על שתי טבעות.

ג) מברשות, המחליקות על טבעת חצויה.

ד) עלינו לחברו ישירות לכריכה.

ט"ז16) על מנת שבצרכן, המחובר למחולל, יזרום זרם שכיוונו משתנה בכל מחצית הסיבוב, יש לחברו למחולל באמצעות:

א) מברשות, המחליקות על טבעת אחת.

ב) מברשות, המחליקות על שתי טבעות.

ג) מברשות, המחליקות על טבעת חצויה.

ד) עלינו לחברו ישירות לכריכה.

ט"ז17) הכא"מ המושרה בכריכה:

א) נמצא ביחס ישר לקצב שינוי השטף.

ב) נמצא ביחס הפוך לקצב שינוי השטף.

ג) נמצא ביחס ישר, אם השטף גדל, וביחס הפוך, אם השטף קטן.

ד) אינו תלוי בשטף.

ט"ז18) כא"מ יושרה בכריכה הנתונה בשדה מגנטי:

א) רק כאשר השטף גדל.

ב) רק כאשר השטף קטן.

ג) רק כשהשטף נשאר קבוע.

ד) גם כאשר השטף גדל וגם כאשר הוא קטן.

ט"ז19) ערכו של הכא"מ המושרה בסליל:

א) נמצא ביחס ישר לקצב שינוי השטף, וביחס הפוך למספר הכריכות.

ב) נמצא ביחס ישר למספר הכריכות, וביחס הפוך לקצב שינוי השטף.

ג) נמצא ביחס ישר למספר הכריכות ולקצב שינוי השטף.

ד) תלוי רק בקצב שינוי השטף, ואינו תלוי במספר הכריכות.

ט"ז20) לפי חוק לנץ – כיוון הכא"מ המושרה בסליל, כתוצאה משינוי השטף המגנטי הוא כזה שהזרם שיוזרם על-ידו בסליל:

א) ייצור שטף המגביר את השטף המקורי.

ב) ייצור שטף המחליש את השטף המקורי.

ג) ייצור שטף המתנגד לשינוי השטף המקורי.

ד) יהיה מנוגד לכא"מ המושרה בסליל.

ט"ז21) השראה עצמית היא:

א) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל אחד כתוצאה משינוי שטף מגנטי, הנוצר על-ידי סליל שני הנמצא בקרבתו.

ב) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל, בהיותו מסתובב בין הקוטבים של מגנט.

ג) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל, בשעה שמקרבים אליו מגנט קבוע.

ד) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל, כתוצאה משינוי שטף שהוא עצמו יוצר.

ט"ז22) אם מגדילים את עוצמת הזרם, הזורם בסליל, יושרה בסליל כא"מ, אשר:

א) יגרום לזרימת זרם, שכיוונו מנוגד לכיוון הזרם המקורי.

ב) יגרום לזרימת זרם, שכיוונו ככיוון הזרם המקורי.

ג) לא יגרום לזרימת זרם בסליל.

ד) יגרום לזרימת זרם חילופין בסליל.

ט"ז23) תופעת ההשראה העצמית:

א) כפופה לחוק לנץ, בתנאי שעוצמת הזרם בסליל גדלה.

ב) כפופה לחוק לנץ, בתנאי שעוצמת הזרם בסליל קטנה.

ג) אינה כפופה כלל לחוק לנץ.

ד) כפופה לחוק לנץ בכל מקרה של שינוי עוצמת הזרם.

ט"ז24) מקדם ההשראה העצמית (ההשראות) של משרן היא 1 הנרי, אם:

א) שינוי הכא"מ בוולט אחד יגרום לזרימת זרם שעוצמתו אמפר אחד.

ב) שינוי עוצמת הזרם בשיעור אמפר אחד בשנייה, יגרום לכא"מ מושרה בשיעור וולט אחד.

ג) שינוי עוצמת הזרם בשיעור אמפר אחד יגרום לכא"מ מושרה בשיעור וולט אחד.

ד) כא"מ בשיעור וולט אחד יזרים זרם בשיעור אמפר אחד דרך הסליל, כאשר התנגדותו היא אום אחד.

ט"ז25) אם נכניס ליבת ברזל לתוך סליל:

א) ההשראות שלו תגדל.

ב) ההשראות שלו תקטן.

ג) ההשראות שלו לא תשתנה.

ד) ההשראות שלו תבוטל.

ט"ז26) הכוח האלקטרו-מניע של השראה עצמית נמצא:

א) ביחס ישר לעוצמת הזרם הזורם בסליל.

ב) ביחס הפוך לעוצמת הזרם הזורם בסליל.

ג) ביחס ישר לקצב השינוי של עוצמת הזרם הזורם בסליל.

ד) ביחס הפוך לקצב השינוי של עוצמת הזרם הזורם בסליל.

ט"ז27) השראה הדדית היא:

א) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל אחד, כתוצאה משינוי שטף מגנטי, הנוצר על-ידי סליל שני הנמצא בקרבתו.

ב) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל, כתוצאה משינוי שטף שהוא עצמו יוצר.

ג) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל בהיותו מסתובב בין קטביו של מגנט.

ד) הופעת כא"מ מושרה בתוך סליל בשעה שמקרבים אליו מגנט קבוע.

ט"ז28) ההשראות ההדדית היא הנרי אחד אם:

א) שינוי מתח בשיעור וולט אחד, בסליל הראשוני, גורם לשינוי מתח בשיעור וולט אחד בסליל השניי.

ב) שינוי עוצמת זרם בשיעור אמפר אחד, בסליל הראשוני, גורם לשינוי עוצמת זרם בשיעור אמפר אחד בסליל השניי.

ג) שינוי עוצמת זרם בשיעור אמפר אחד, בסליל הראשוני, גורם לכך שבסליל השניי יושרה כא"מ בשיעור וולט אחד.

ד) שינוי עוצמת זרם בשיעור אמפר אחד בשנייה, בסליל הראשוני, גורם לכך שבסליל השניי יושרה כא"מ בשיעור וולט אחד.

ט"ז29) השראות הדדית נמדדת ביחידות:

א) הרץ.
ב) הנרי.
ג) ווּבר.
ד) ווּבר-למ"ר.

ט"ז30) אם הסליל השניי מהווה חלק של מעגל חשמלי סגור, יגרום הכא"מ המושרה בו לזרימת זרם, אשר:

א) יחזק את השטף שייצר אותו.
ב) יחליש את השטף שייצר אותו.
ג) יפעל נגד כיוון שינוי השטף שייצר אותו.
ד) יפעל בכיוון שינוי השטף שייצר אותו.

ט"ז31) תופעת ההשראה ההדדית:

א) כפופה לחוק לנץ רק כאשר עוצמת הזרם בסליל הראשוני עולה.
ב) כפופה לחוק לנץ רק כאשר עוצמת הזרם בסליל הראשוני יורדת.
ג) כפופה לחוק לנץ בשני המקרים הנ"ל.
ד) אינה כפופה כלל לחוק לנץ.

ט"ז32) שני סלילים כרוכים זה על גבי זה ללא ליבת ברזל.
אם מחדירים ליבת ברזל לתוך חלל הסליל:

א) יגדל מקדם ההשראה ההדדית.
ב) יקטן מקדם ההשראה ההדדית.
ג) לא ישתנה מקדם ההשראה ההדדית.
ד) יבוטל מקדם ההשראה ההדדית.

ט"ז33) גורם הצימוד בין שני סלילים הוא:

א) היחס בין מקדמי ההשראה העצמית של הסלילים.
ב) מכפלת מקדמי ההשראה העצמית של הסלילים.
ג) היחס בין מספר הכריכות שבסליל השניי לזה שבסליל הראשוני.
ד) היחס בין שינוי השטף החותך את הסליל השניי לבין זה שנוצר על-ידי הסליל הראשוני.

ט"ז34) שנאי הוא מכשיר הפועל על עקרון:

א) ההשראה העצמית.
ב) ההשראה ההדדית.
ג) ההשראה העצמית וההשראה ההדדית.
ד) אף אחת מהתשובות הנ"ל אינה נכונה.

ט"ז35) בשנאים משתמשים ברשתות:

א) זרם ישר.
ב) זרם חילופין.
ג) זרם ישר וזרם חילופין.
ד) מתח גבוה בלבד.

ט"ז36) יחס המתחים בשנאי הוא:

א) ישר ליחס מספר הכריכות.
ב) הפוך ליחס מספר הכריכות.
ג) ישר ליחס עוצמות הזרמים.
ד) אין קשר בין יחס המתחים ליחס הכריכות וליחס הזרמים.

ט"ז37) **זרמי מערבולת הם זרמים הזורמים:**

א) בתילי הסליל במגמה מנוגדת לזרם המקורי.

ב) בתילי הסליל במגמה זהה למגמת הזרם המקורי.

ג) בתילי הסליל במגמה משתנה.

ד) בליבת הברזל, כתוצאה מכא"מ המושרה בה.

ט"ז38) **זרמי מערבולת, בליבת ברזל של סליל, אשר זורם בו זרם ישר שעוצמתו קבועה:**

א) יהיו גדולים מאד.

ב) יהיו קטנים מאד.

ג) יהיו תלויים בעוצמת הזרם.

ד) לא יהיו קיימים כלל.

ט"ז39) **זרמי מערבולת בליבת ברזל גורמים ל-:**

א) מיגנוט הליבה.

ב) ביטול מיגנוט הליבה.

ג) חימום הליבה.

ד) אינם גורמים לשום השפעה.

ט"ז40) **כדי לצמצם את זרמי המערבולת בליבות ברזל:**

א) בונים את הליבות מפחים דקים ומבודדים זה מזה.

ב) בונים את הליבות מגוש אחד.

ג) בונים את הליבות מנחושת.

ד) בונים את הליבות מברזל בעל חלחלות גבוהה ככל האפשר.

ט"ז1) תייל שאורכו 30 ס"מ נע בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1 ווبר-למ"ר, בכיוון מאונך לקווי הכוח. חשב את ערך הכא"מ המושרה בתייל, אם הוא נע במהירות של 0.5 מטר בשנייה.

ט"ז2) מוליך נע, בשדה מגנטי בעל השראה של 0.5 וולט-שניות למ"ר, במהירות 20 מטר-בשנייה. אורך המוליך בתחום קווי הכוח הוא 20 ס"מ ומסלול תנועתו ניצב לקווי הכוח. חשב את ערך הכא"מ המושרה במוליך.

ט"ז3) בתייל, שאורכו 30 ס"מ, אשר נע במהירות של 4 מטר-בשנייה, בשדה מגנטי אחיד, בניצב לקווי הכוח, מתפתח כא"מ של 0.6 וולט.
חשב את ההשראה בשדה.

ט"ז4) תייל, שאורכו 50 ס"מ, מהווה חלק ממעגל חשמלי, שהתנגדותו השקולה היא 0.1 אום. התייל נע בשדה מגנטי, אשר השראתו היא 1 ווبר-למ"ר, במהירות של 2 מטר-בשנייה, במאונך לקווי הכוח.
חשב את עוצמת הזרם במעגל ואת הכוח הפועל על התייל.

ט"ז5) מוליך, שאורכו 0.5 מטר, נע בשדה מגנטי אחיד במהירות של 20 מטר-בשנייה.
צפיפות השטף בשדה היא **1.2 ווبר-למ"ר**
חשב את ערך ההספק החשמלי, המתפתח במוליך, בהזנחת התנגדותו, אם התנגדות המעגל החיצוני היא 0.1 אום.

ט"ז6) מסיעים מוליך, שאורכו 1.2 מ', במהירות של 2 מטר-בשנייה, בזווית ישרה לכיוון שדה מגנטי, שהשראתו 2 ווبר-למ"ר.
חשב את ערכו של הכא"מ המושרה, אם מחברים את קצות המוליך במעגל חשמלי, שהתנגדותו השקולה היא 2.4 אום, איזה כוח יפעל על המוליך?

ט"ז7) מוליך, שאורכו 0.5 מטר והתנגדותו 0.01 אום, מחובר במעגל חשמלי, ומפל המתח בו הוא בשיעור 0.5 וולט. המוליך נע בשדה מגנטי, שהשראתו 1.4 ובר-למ"ר, בניצב לקווי הכוח, במהירות של 50 ס"מ-בשנייה.
חשב את עוצמת הזרם הזורם במוליך בשעת התנועה.
הדרכה: תנועת המוליך בשדה המגנטי גורמת להשראת כא"מ, שמגמתו הפוכה למגמת הכא"מ המקורי.

ט"ז8) מוליך, שאורכו 50 ס"מ והתנגדותו 0.01 אום, מהווה חלק של מעגל חשמלי, ובין קצותיו שורר מתח בשיעור 0.5 וולט. המוליך נע בשדה מגנטי אחיד במסלול מאונך לקווי הכוח ובמהירות 0.5 מטר-בשנייה. ההשראה בשדה המגנטי היא 1.4 וולט-שנייה למ"ר. חשב:

א) את הכא"מ המושרה במוליך.
ב) את עוצמת הזרם הזורם במוליך.
ג) את שיעור הכוח הפועל על המוליך.
ד) את ההספק המתפזר במוליך.

ט"ז9) דיסקה מתכתית, בעלת רדיוס של 5 ס"מ, מסתובבת סביב צירה במהירות 1200 סיבובים בדקה, בניצב לקווי הכוח של שדה מגנטי אחיד, שהשראתו 0.2 ובר-למ"ר. חשב את הכא"מ, המושרה בין היקף הדיסקה למרכזה.
הדרכה: הנח שרדיוס הדיסקה הוא כאילו אורך התייל.

ט"ז10) תייל ישר עובר בין קטביו של שדה מגנטי, שהשראתו 0.24 ובר-למ"ר, בקצב של 40 פעם בשנייה אחת. חשב את ערכו של הכא"מ המושרה בתייל, אם שטח הקטבים הוא 50×75 ס"מ.

ט"ז11) מוליך נע בשדה מגנטי, שצפיפות השטף בו היא 0.8 וולט-שניות למ"ר, במהירות 10 מטר-בשנייה, בזווית בת 30° כלפי קווי הכוח.
אורכו הפעיל של המוליך 30 ס"מ. חשב את ערכו של הכא"מ המושרה במוליך.

ט"ז12) תייל ישר, שאורכו 1 מ', נע בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1.2 ובר-למ"ר, בכיוון ניצב לקווי הכוח ובמהירות 20 מטר-בשנייה. התייל מהווה חלק ממעגל חשמלי, שהתנגדותו הכוללת היא 0.1 אום. חשב את עוצמת הזרם הזורם במעגל ואת שיעור הכוח הפועל בכיוון מנוגד לתנועת התייל.

ט"ז13) מוליך, שאורכו הפעיל הוא 80 ס"מ, נע במסלול מעגלי במהירות אחידה בשדה אחיד בעל השראה של 0.8 ווبר-למ"ר. קוטר מסלול התנועה הוא 30 ס"מ, והתייל מבצע 3000 סיבובים בדקה. חשב:

א) את תדירות הכא"מ המושרה.

ב) את ערכו המירבי של הכא"מ המושרה.

הדרכה: תוך סיבוב אחד מתקבל מחזור אחד, וכזכור התדירות מבטאת את מספר המחזורים בשנייה אחת.

ט"ז14) כריכה מלבנית, שאורכה הפעיל הוא 50 ס"מ, מסתובבת בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1 ווبר-למ"ר, במהירות של 10 מטר-בשנייה. חשב את ערכו הריגעי של הכא"מ המושרה בכריכה, ברגע שכיוון התנועה ניצב לקווי הכוח, ברגע שכיוון התנועה יוצר זווית בת °30 עם קווי הכוח ובהיותם מקבילים.

ט"ז15) כריכה מסתובבת בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 0.45 ווبר-למ"ר, במהירות של 2000 סיבובים בדקה. רוחב הכריכה 8.5 ס"מ ואורכה הפעיל (בכיוון ציר הסיבוב) הוא 8 ס"מ. חשב את הכא"מ הריגעי המושרה בכריכה, כאשר הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין כיוון השדה היא בת °90

ט"ז16) כריכה מסתובבת בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 0.8 ווبר-למ"ר, במהירות 100 סיבובים בדקה. רוחב הכריכה 30 ס"מ ואורכה הפעיל 51 ס"מ.
חשב את ערכו הריגעי של הכא"מ המושרה בכריכה, כאשר הזווית בין כיוון התנועה של התייל לבין כיוון השדה היא °30 .

ט"ז17) כריכה מסתובבת סביב צירה, במהירות של 450 סיבובים בדקה, בתוך שדה מגנטי אחיד, שהשראתו 1.2 ווبר-למ"ר.
רוחב הכריכה הוא 20 ס"מ ואורכה, בכיוון הציר, הוא 30 ס"מ.
חשב את ערכו של הכא"מ המירבי המושרה בכריכה. מהו השטף המירבי העובר דרך הכריכה?

ט"ז18) סליל מלבני בעל 4 כריכות מסתובב, סביב צירו, בשדה מגנטי אחיד, שהשראתו 0.8 ווبר-למ"ר, במהירות של 50 סבובים בשנייה.
האורך הפעיל של הסליל הוא 32 ס"מ ורוחבו 16 ס"מ.
חשב את הכא"מ הריגעי, המופיע בין קצות הסליל, ברגע שהזווית בין כיוון התנועה לבין קווי הכוח היא $90°$.

ט"ז19) סליל מלבני, בעל 250 כריכות, מסתובב סביב צירו במהירות של 120 סיבובים לדקה בתוך שדה מגנטי אחיד.
שיעור השטף המירבי, החודר דרך הסליל, הוא 0.08 ווبר.
חשב את ערכו של הכא"מ המירבי המתעורר בסליל.

ט"ז20) תייל נע במהירות קצובה, בשדה מגנטי אחיד, בניצב לקווי הכוח.
תוך תנועתו חותך התייל שטף בשיעור 0.1 ווبר בפרק זמן של 0.1 שנייה.
חשב את הכא"מ המושרה בתייל.

ט"ז21) שטף בשיעור 4×10^{-4} וולט-שנייה חותך את כריכותיו של סליל, בעל 50 כריכות בפרק זמן של מאית השנייה. חשב את ערכו של הכא"מ המושרה.

ט"ז22) ערכו של השטף, החודר דרך סליל בעל 1000 כריכות, משתנה מ- 6×10^{-3} ווبר עד 1×10^{-3} ווبר בפרק זמן של 0.1 שנייה.
חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל.

ט"ז23) דרך סליל בעל 100 כריכות חודר שטף מגנטי המשתנה מ-1 מיליווبר עד 5 מיליווبר במשך 2 מילישניות. חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל.

ט"ז24) השטף באלקטרומגנט תעשייתי, בעל 200 כריכות, הוא בשיעור 0.4 ווبר.
מרגע פתיחת המעגל החשמלי ועד לירידת עוצמת הזרם לאפס, חולפת מאית השנייה.
חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה.

ט"ז25) 4 סלילים, שבכל אחד מהם 1000 כריכות, כרוכים על אותה ליבת ברזל ומחוברים בטור. שיעור השטף דרך הסלילים הוא 0.03 ווبر ויורד עד 0.01 ווبר תוך חמישית-השנייה. חשב את ערכו של הכא"מ הממוצע המושרה בסלילים.

ט"ז26) שני סלילים כרוכים על אותה ליבת ברזל, אשר שטח החתך שלה הוא 50 סמ"ר. באחד הסלילים זורם זרם, הגורם השראה מגנטית בשיעור 0.006 ווبר למ"ר. על-ידי הגברת עוצמת הזרם בסליל עולה ההשראה עד כדי 0.156 ווبר למ"ר, תוך פרק זמן של 0.075 שניות. חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל השני, אם מספר כריכותיו הוא 2500 .

הדרכה: חשב תחילה את ערכי השטפים.

ט"ז27) מה ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה במשרן, בעל השראות (מקדם השראה עצמית) של 2 הנרי, אם עוצמת הזרם במשרן ירדה מ-10 אמפר עד אפס תוך מחצית השנייה?

ט"ז28) למעגל חשמלי השראות של 2.4 הנרי. חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ, המושרה במעגל, אם עוצמת הזרם הזורם בו משתנה מ-12 אמפר עד 4 אמפר תוך פרק זמן של עשירית השנייה.

ט"ז29) חשב את ההשראות של סליל, אם בשינוי עוצמת הזרם בשיעור 2 אמפר, בפרק זמן של מאית השנייה, מושרה בו כא"מ שערכו הממוצע הוא 200 וולט.

ט"ז30) מהו שיעור שינוי עוצמת הזרם בשנייה אחת, אם כא"מ ממוצע של 5 וולט מושרה בסליל בעל השראות של 0.1 הנרי?

ט"ז31) חשב את ההשראות של סליל בעל 1000 כריכות, אם שינוי זרם בשיעור 3 אמפר גורם בו לשינוי שטף בשיעור 3×10^{-6} ווبר.

ט"ז32) אלקטרומגנט כרוך 2000 כריכות. השטף בליבה הוא בשיעור 2.5×10^{-3} ווبר. תוך פרק זמן של אלפית שנייה ירד השטף ל- 2.25×10^{-3} ווبר. חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בפרק זמן זה.

ט"ז33) אלקטרומגנט יוצר שטף בשיעור 0.5 ווبר וסליל העירור שלו כרוך 100 כריכות. עם הפסקת זרם העירור יורדת עוצמת הזרם לאפס תוך פרק זמן של 0.01 שנייה. חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל העירור.

ט"ז34) במשרן שטף קבוע של 0.01 ווبר והוא כרוך 50 כריכות. עם ניתוק זרם החשמל יורד השטף לאפס תוך מאית השנייה.
חשב את השיעור הממוצע של הכא"מ המושרה במשרן.

ט"ז35) עוצמת הזרם, הזורם בסליל בעל 600 כריכות, היא 5 אמפר, והשטף הוא בשיעור 10^{-3} ווبר.

א) חשב אח השראות הסליל.

ב) מהו השיעור הממוצע של הכא"מ שיושרה בסליל, אם עוצמת הזרם יורדת לאפס, משנה כיוונה ומגיעה לעוצמה של 5 אמפר בכיוון הפוך.
משך התהליך הוא 0.1 שנייה.

ט"ז36) סליל גלילי, שאורכו 4 ס"מ ושטח חתכו 0.8 סמ"ר, כרוך 200 כריכות.

א) חשב את השראות הסליל.

ב) מה תהיה השראות הסליל, אם נחדיר לתוכו ליבת פלדה בעלת חלחלות יחסית של 15 000?

ט"ז37) על ליבת פלדה, שאורכה 4 ס"מ ושטח חתכה 0.8 סמ"ר, כרוך סליל בעל 200 כריכות.

א) חשב את השראות הסליל, אם החלחלות היחסית של הפלדה היא 3000.

ב) חשב את השיעור הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל, אם עוצמת הזרם משתנה בשיעור 30 מיליאמפר בפרק זמן של 5 מילישניות.

ט"ז38) על טבעת ברזל בעלת חלחלות יחסית 1335, בעלת אורך ממוצע 100 ס"מ, ושטח חתך 10 סמ"ר, כרוך סליל עירור בעל 600 כריכות, הנושא זרם שעוצמתו 2 אמפר.
על סליל זה כרוך סליל שני בעל 5000 כריכות.
בעת ניתוק הזרם יורדת עוצמתו בסליל הראשון לאפס בפרק זמן של 0.01 שנייה.
חשב את השיעור הממוצע של הכא"מ, המושרה בסליל השני.
הדרכה: חשב תחילה את השטף בטבעת.

ט"ז39) זרם קבוע שעוצמתו 2.2 אמפר זורם דרך סליל בעל 4800 כריכות, אשר השראותו 10 הנרי. חשב את שיעור השטף בסליל.

ט"ז40) דרך סליל, שהשראותו 10^{-4} הנרי ומספר כריכותיו 50, זורם זרם קבוע שעוצמתו 6 אמפר. חשב את שיעור השטף בסליל.

ט"ז41) דרך סליל בעל 780 כריכות זורם זרם שעוצמתו 4.1 אמפר.
חשב את השראות הסליל, אם השטף בו הוא בשיעור 4.2×10^{-3} ווובר.

ט"ז42) מקדם ההשראה ההדדית (ההשראות ההדדית) בין שני סלילים הוא 0.3 הנרי.
בסליל הראשון זורם זרם, שעוצמתו 2 אמפר.
עוצמת הזרם בסליל הראשון יורדת לאפס בפרק זמן של 0.04 שניות.
חשב את השיעור הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל השני.

ט"ז43) חשב את ההשראות ההדדית בין שני סלילים, אם שינוי עוצמת זרם בשיעור 0.5 אמפר, בפרק זמן של אלפית השנייה, בסליל הראשון, גרם להופעת כא"מ מושרה ממוצע בשיעור 5 וולט.

ט"ז44) עוצמת הזרם, הזורם בסליל אחד, היא 3 אמפר. בקירבתו מצוי סליל שני בעל 400 כריכות. חשב את ההשראות ההדדית של שני הסלילים, אם שטף חלקי בשיעור 1.2 מיליוובר משתלב עם הסליל השני.

ט"ז45) לשני סלילים צמודים השראות הדדית של 6 מיליהנרי. בסליל הראשוני משתנה עוצמת הזרם בשיעור 40 אמפר בפרק זמן של 2 מילישניות.
חשב את ערכו הממוצע של הכא"מ המושרה בסליל השניי.

ט"ז46) בסליל הראשוני של שני סלילים צמודים השתנתה עוצמת הזרם מ-12 אמפר עד 2 אמפר בפרק זמן של 0.5 מילישנייה. כתוצאה מכך הושרה, בסליל השניי, כא"מ שערכו הממוצע הוא 60 וולט. חשב את ההשראות ההדדית.

ט"ז47) גורם הצימוד בין שני סלילים הוא 0.6, ההשראות של הסליל הראשוני היא 0.25 הנרי ושל השניי 0.36 הנרי. חשב את ההשראות ההדדית בין שני הסלילים.

ט"ז48) על ליבת ברזל בעלת חלחלות 1200, אורך 20 ס"מ ושטח חתך 10 סמ"ר כרוכים שני סלילים, שמספר כריכותיהם 500 ו-1000.
חשב את ההשראות ההדדית בין שני הסלילים.

ט"ז49) מספר הכריכות בסליל הראשוני של שנאי הוא 800 ובסליל השניי 400.
בסליל הראשוני זורם זרם חילופין שערצמתו 2 אמפר.
חשב את ערצמת הזרם במעגל המחובר לסליל השניי.

ט"ז50) מספר הכריכות של שנאי מנמיך מתח הוא 1000 ו-500.
חשב את הכא"מ, השורר בין הדקי הסליל השניי, אם הסליל הראשוני מחובר לרשת 220 וולט.

ט"ז51) מספר הכריכות של שנאי מעלה מתח הוא 1000 ו-1500.
חשב את הכא"מ השורר בין הדקי הסליל השניי, אם הראשוני מחובר למקור מתח חילופין של 200 וולט.

ט"ז52) הסליל הראשוני של שנאי הוא בעל 800 כריכות ומחובר לרשת מתח חילופין של 220 וולט. הסליל השניי, בעל 160 כריכות, מחובר לצרכן שהתנגדותו 20 אום.
חשב את ערצמת הזרם הזורם דרך הצרכן ואת ערצמת הזרם הזורם בסליל הראשוני של השנאי.

ט"ז53) אל הסליל השניי של שנאי מחובר צרכן, הצורך הספק בשיעור 44 וט.
חשב את ערצמת הזרם הזורם בסליל הראשוני, אם הוא מחובר לרשת 220 וולט.